LE SCIENZE
edizione italiana di SCIENTIFIC AMERICAN

numero 91
marzo 1976
anno IX
volume XVI

Il sistema solare

Un panorama sulle conoscenze attuali con particolare riferimento ai dati ottenuti nel corso di 18 anni di esplorazione per mezzo di sonde spaziali lanciate dalla Terra

di Carl Sagan

Proviamo a descrivere gli avvenimenti che portarono alla formazione della Terra in base ad alcune recenti teorie ancora in discussione. Circa 4,6 miliardi di anni fa il pianeta completò la sua aggregazione a partire da gas e polvere interstellari. Gli ultimi planetesimali di origine solare che contribuirono a formare la Terra produssero, cadendo su di essa, enormi crateri d'impatto; il pianeta si riscaldò nel suo interno in conseguenza dell'energia potenziale gravitazionale generatasi nel corso del processo della sua formazione e dell'energia proveniente dal decadimento dei suoi elementi radioattivi; il pesante nucleo di ferro liquido si separò dal mantello, più leggero, formato da silicati, e dalla crosta; gas ricchi di idrogeno e vapore acqueo (che si sarebbe successivamente condensato in acqua) liberati dall'interno terrestre giunsero in superficie e una chimica organica molto semplice fornì gradualmente molecole complesse che si combinarono dando origine a sistemi molecolari capaci di autoriprodursi: i primi organismi terrestri. La pioggia di oggetti di origine interplanetaria diminuì a poco a poco e nel corso del tempo le acque superficiali, il vento, fenomeni orogenetici e altri processi geologici cancellarono le cicatrici connesse all'origine della Terra. Un vasto meccanismo di convezione su scala planetaria accumulò sui fondali dell'oceano i materiali usciti da spaccature del mantello formando grandi zolle crostali e risospingendo poi, con moto inverso, i materiali entro il mantello ai margini dei continenti; gli urti fra grandi zolle determinarono il sollevamento di enormi pieghe sulla superficie terrestre: le catene montuose; la configurazione generale delle terre emerse, dei mari, delle regioni glaciali e tropicali continuò a variare. Nel frattempo la selezione naturale scelse, in mezzo alle varie alternative possibili, organismi i cui sistemi molecolari capaci di autoriprodursi meglio si adattavano agli ultimi mutamenti che avevano avuto luogo nell'ambiente. Si svilupparono piante dotate della capacità di servirsi della luce visibile per scomporre l'acqua in ossigeno e idrogeno; quest'ultimo gas sfuggì nello spazio, trasformando l'atmosfera da mezzo riducente a mezzo ossidante. Sorsero infine organismi di modesta complessità e intelligenza.

Il passaggio fondamentale nell'evoluzione del moderno modello eliocentrico del moto dei pianeti è rappresentato simbolicamente nella figura della pagina a fronte. La figura è un particolare di una grande xilografia colorata a mano raffigurante il sistema solare. La xilografia fa parte di un insieme di 30 carte astronomiche compilate da Johann Gabriel Doppelmayer di Norimberga e pubblicate nel 1742 col titolo *Atlas novus coelestis*. I due diagrammi circolari raffigurano il sistema planetario secondo i due grandi astronomi cinquecenteschi Tycho Brahe e Nicola Copernico. Le iscrizioni latine sui due nastri gialli che fungono da didascalie per i due diagrammi significano « Sistema di Tycho, (che) visse attorno alla fine del Cinquecento » e: « Sistema di Copernico, (che) visse attorno all'inizio del Cinquecento ». Le espressioni in corsivo sotto ciascun diagramma possono essere tradotte rispettivamente: « Così (vide) con gli occhi » nel caso di Tycho Brahe (che si distinse soprattutto come osservatore) e: « Così (dedusse) con la ragione » nel caso di Copernico (che era soprattutto noto come l'ideatore della teoria eliocentrica). La figura femminile, che raffigura presumibilmente Urania, la musa dell'astronomia, predilige chiaramente il sistema copernicano rispetto a quello di Tycho. (Nel sistema copernicano, come nella concezione moderna, i pianeti orbitano attorno al Sole, che occupa la posizione centrale; il sistema di Tycho, seguendo la tradizione tolemaica, che aveva dominato nel Medioevo, continua a collocare la Terra al centro, ma tenta di spiegare le osservazioni facendo orbitare gli altri pianeti attorno al Sole, mentre il Sole, come la Luna, gira intorno alla Terra.) Il significato dei simboli planetari è indicato nella tabella a pagina 14. (Gli altri simboli sono quelli delle costellazioni dello zodiaco.) La copia dell'atlante di Doppelmayer da cui è stata fatta questa riproduzione è alla biblioteca Burndy a Norwalk (Conn.).

Nel corso di tutta questa successione di eventi, un immaginario osservatore sarebbe colpito soprattutto dall'isolamento della Terra. Sulla superficie terrestre arrivano la luce del Sole e delle stelle insieme a radiazioni cosmiche e, a volte, anche detriti interplanetari, ma nel corso di tutte quelle ere interminabili nulla abbandonò la superficie del pianeta tranne un po' di idrogeno e di elio. Poi, meno di venti anni

fa, il pianeta cominciò improvvisamente, come un pappo di soffione che scoppia per diffondere i semi, a lanciare piccole capsule all'interno del sistema solare. Le prime entrarono in orbita attorno alla Terra; altre si diressero verso il satellite naturale della Terra, la Luna. Sei piccole capsule, solo un po' più grandi delle altre, si posarono sulla Luna e da ciascuna di esse uscirono due piccoli organismi, i quali esplorarono rapidamente le adiacenze immediate del loro punto di atterraggio e poi ripartirono per la Terra, dopo aver proteso il braccio quasi per saggiare l'oceano cosmico. Cinque piccoli veicoli spaziali penetrarono nell'antro infernale dell'atmosfera di Venere e tre di essi resistettero per alcune decine di minuti sulla sua superficie prima di essere distrutti dal calore. Una quindicina di sonde spaziali furono lanciate verso Marte; una di esse trasmise informazioni per un intero anno dalla sua orbita attorno al pianeta. Un'altra modificò la sua traiettoria passando in prossimità di Venere diretta verso Mercurio: la sua traiettoria era tale che le fu possibile sfiorare molte volte il pianeta più interno del sistema solare. Una missione ancora più fortunata è quella di due sonde spaziali, le quali, superata la cintura degli asteroidi, stanno passando in prossimità di Giove e, accelerate dalla sua enorme gravità, si spingeranno nello spazio interstellare.

Siamo entrati, quasi senza rendercene conto, in un'era di esplorazioni e di scoperte che non ha l'uguale; per trovare qualcosa di paragonabile dobbiamo tornare indietro fino al Rinascimento, quando, nel corso di una trentina di anni, i navigatori europei solcarono l'Atlantico per estendere le loro conoscenze sull'intero globo.

La grande figura nella pagina a fronte rappresenta il sistema solare nel mese di settembre 1975 con le orbite planetarie disegnate tutte in scala; qui sopra presentiamo un ingrandimento della parte centrale della figura. I punti bianchi indicano solo la posizione dei pianeti, non la loro grandezza; poiché il diametro medio dell'orbita terrestre è circa 200 volte più grande del diametro solare, il Sole stesso sarebbe, alla scala di entrambi i diagrammi, soltanto un puntino appena percettibile. Per convenzione la longitudine eliocentrica di ciascun pianeta è misurata in gradi a partire dall'equinozio invernale (*linea retta orizzontale*). Le curve tratteggiate indicano la parte dell'orbita di ciascun pianeta che giace al di sotto del piano orbitale della Terra (dell'eclittica). L'orbita di Plutone è anomala sotto vari punti di vista. Essa è la sola orbita planetaria la cui eccentricità possa essere distinta, alla scala di questi diagrammi, da quella di una « ellisse zero » (un cerchio). Essa presenta inoltre la più forte inclinazione rispetto all'eclittica: più di 17 gradi. Queste e altre considerazioni hanno indotto taluni astronomi a considerare Plutone non un pianeta vero e proprio bensì un satellite di Nettuno sfuggito alla forza gravitazionale del suo pianeta. A cominciare dal 1987 Plutone perderà anche la sua particolarità di essere il pianeta più esterno nel sistema solare; quando infatti si muoverà verso il perielio, la sua orbita diventerà per un tratto più interna a quella di Nettuno.

È utile – e un po' umiliante – iniziare collocando il nostro piccolo, isolato sistema solare nella sua esatta prospettiva cosmica. La Terra è un frammento di roccia e metallo che naviga in un flusso di luce solare in uno dei recessi più interni del sistema solare. Altre minuscole sfere di roccia e metallo – Mercurio, Venere e Marte – percorrono strette orbite nelle più immediate adiacenze del Sole. Questi pianeti interni e i loro satelliti non hanno un grande peso nell'economia del sistema solare nel suo complesso. La massima parte della massa, del momento angolare e dell'interesse apparente del sistema solare risiede nei pianeti gioviani: quattro sfere immense, dotate di una rapida rotazione. I due più interni, Giove e Saturno, constano in gran parte di idrogeno e di elio; Giove, in realtà, ha l'aspetto, più che di un pianeta, di una stella abortita. I due più esterni, Urano e Nettuno, hanno una composizione in cui compare una minore quantità dei gas più leggeri, mentre hanno in prevalenza gas più pesanti come il metano e l'ammoniaca. Giove impiega quasi 12 anni per completare la sua rivoluzione attorno al Sole, a una distanza media di circa cinque unità astronomiche. (Un'unità astronomica, simbolo UA, è la distanza media tra Terra e Sole, ossia circa 150 milioni di chilometri.) Al di là dei pianeti gioviani si muove, su un'orbita fortemente eccentrica, a circa 40 UA, Plutone, che è il più piccolo e meno noto dei pianeti. Molto più lontano, a circa 100 000 UA, vi sono alcuni miliardi di comete prive di coda, palle di neve aventi un diametro dell'ordine di un chilometro che orbitano lentamente attorno al Sole.

Visto da una distanza ancora maggiore, ossia da alcune centinaia di migliaia di UA, il Sole apparirebbe a occhio nudo come una stella brillante, senza alcun indizio che potesse far pensare al suo seguito di pianeti. Questa distanza sarebbe equivalente ad alcuni anni luce (l'anno luce, simbolo al, equivale a circa 60 000 unità astronomiche), che rappresentano la distanza tipica fra le stelle nella nostra minuscola galassia. A una distanza di alcune decine di anni luce il Sole sarebbe del tutto invisibile a occhio nudo e una tale distanza è soltanto un millesimo circa della distanza che separa il Sole dal centro della nostra galassia. È questa un'enorme ruota, formata da circa 250 miliardi di stelle simili al Sole, in lenta rotazione e il denso piano centrale di essa, visto in sezione, è la banda diffusa nota come Via Lattea. La nostra galassia è soltanto una dei miliardi, e forse centinaia di miliardi, di galassie esistenti nell'universo. Il nostro sistema solare è soltanto un esempio di un fenomeno che deve sicuramente ripetersi innumerevoli volte nella vastità dello spazio e del tempo.

Se i 4,6 miliardi di anni della storia della Terra fossero compressi in un solo anno, la grande attività connessa all'esplorazione spaziale avrebbe avuto inizio da meno di un decimo di secondo. I mutamenti fondamentali nell'atteggiamento e nelle conoscenze responsabili di questa notevole trasformazione avrebbero impiegato a realizzarsi solo alcuni secondi, dal momento della costruzione e messa a punto di semplici lenti e specchi ai fini dell'osservazione astronomica, nel XVII secolo. Prima di allora i pianeti erano noti da millenni come corpi diversi dalle « stelle fisse » le quali apparivano immobili l'una rispetto all'altra. I pianeti (il termine deriva dal greco e significa errante) erano più splendenti di quasi tutte le stelle e si muovevano rispetto allo sfondo costituito dalle stelle fisse. Poiché il Sole e la Luna esercitavano manifestamente un'influenza sulla Terra, gli astrologi ritennero che anche i pianeti dovessero influire sulla vita umana, ma in modi più sottili. Quasi nessuno fra gli antichi pensò che i pianeti dovessero essere mondi in qualche senso simili alla Terra. Con l'acquisizione del primo cannocchiale, però, Galileo osservò con stupore e piacere indicibili le fasi di Venere e le montagne e i crateri della Luna. Keplero pensava che i crateri fossero stati costruiti da esseri intelligenti che abitavano sulla Luna. Da lui dissentì però Christiaan Huygens, il quale sostenne che la costruzione di tali grandi depressioni circolari avrebbe richiesto uno sforzo irragionevolmente grande e pensò che essi dovessero avere una spiegazione naturale.

Huygens seppe unire una tecnica perfezionata e una grande abilità sperimentale a una mente ragionevole e scettica aperta a nuove idee. Egli fu il primo a suggerire che su Venere noi osserviamo non il corpo solido del pianeta bensì un'atmosfera e una copertura di nubi, fu il primo a capire la vera natura degli anelli di Saturno (che a Galileo avevano dato l'impressione di due « orecchie »), fu il primo a disegnare un carattere riconoscibile sul disco di Marte (la Syrtis Major) e il secondo (dopo Robert Hooke) a disegnare la grande macchia rossa di Giove. Queste ultime due osservazioni hanno un significato di attualità in quanto confermano che i caratteri principali della superficie dei pianeti si sono conservati nel corso di almeno tre secoli. (Huygens, ovviamente, non fu un astronomo del tutto moderno e non si sottrasse ai modi di pensare del suo tempo. È sufficiente, per rendersene conto, considerare la curiosa argomentazione con cui dedusse l'esistenza su Giove di piante di canapa. Galileo aveva osservato quattro satelliti orbitanti attorno a Giove. Huygens si pose una domanda che ben pochi astronomi si porrebbero oggi: perché Giove ha quattro lune? Per rispondere a

	MERCURIO	VENERE	TERRA	MARTE	GIOVE	SATURNO	URANO	NETTUNO	PLUTONE
DISTANZA MASSIMA DAL SOLE (MILIONI DI CHILOMETRI)	69,7	109	152,1	249,1	815,7	1507	3004	4537	7375
DISTANZA MINIMA DAL SOLE (MILIONI DI CHILOMETRI)	45,9	107,4	147,1	206,7	740,9	1347	2735	4456	4425
DISTANZA MEDIA DAL SOLE (MILIONI DI CHILOMETRI)	57,9	108,2	149,6	227,9	778,3	1427	2869,6	4496,6	5900
DISTANZA MEDIA DAL SOLE (UNITÀ ASTRONOMICHE)	0,387	0,723	1	1,524	5,203	9,539	19,18	30,06	39,44
PERIODO DI RIVOLUZIONE	88 GIORNI	224,7 GIORNI	365,26 GIORNI	687 GIORNI	11,86 ANNI	29,46 ANNI	84,01 ANNI	164,8 ANNI	247,7 ANNI
PERIODO DI ROTAZIONE	59 GIORNI	-243 GIORNI ROTAZIONE RETROGRADA	23 ORE 56 MINUTI 4 SECONDI	24 ORE 37 MINUTI 23 SECONDI	9 ORE 50 MINUTI 30 SECONDI	10 ORE 14 MINUTI	-11 ORE ROTAZIONE RETROGRADA	16 ORE	6 GIORNI 9 ORE
VELOCITÀ ORBITALE (CHILOMETRI AL SECONDO)	47,9	35	29,8	24,1	13,1	9,6	6,8	5,4	4,7
INCLINAZIONE DELL'ASSE	<28°	3°	23°27′	23°59′	3°05′	26°44′	82°5′	28°48′	?
INCLINAZIONE DELL'ORBITA RISPETTO ALL'ECLITTICA	7°	3,4°	0°	1,9°	1,3°	2,5°	0,8°	1,8°	17,2°
ECCENTRICITÀ DELL'ORBITA	0,206	0,007	0,017	0,093	0,048	0,056	0,047	0,009	0,25
DIAMETRO EQUATORIALE (CHILOMETRI)	4880	12 104	12 756	6787	142 800	120 000	51 800	49 500	6000 (?)
MASSA (TERRA = 1)	0,055	0,815	1	0,108	317,9	95,2	14,6	17,2	0,1 (?)
VOLUME (TERRA = 1)	0,06	0,88	1	0,15	1316	755	67	57	0,1 (?)
DENSITÀ (ACQUA = 1)	5,4	5,2	5,5	3,9	1,3	0,7	1,2	1,7	?
APPIATTIMENTO	0	0	0,003	0,009	0,06	0,1	0,06	0,02	?
ATMOSFERA (COMPONENTI PRINCIPALI)	NESSUNO	ANIDRIDE CARBONICA	AZOTO, OSSIGENO	ANIDRIDE CARBONICA, ARGO (?)	IDROGENO, ELIO	IDROGENO, ELIO	IDROGENO, ELIO, METANO	IDROGENO, ELIO, METANO	NESSUN RILIEVO
TEMPERATURA MEDIA ALLA SUPERFICIE VISIBILE (S = SUOLO, N = NUBI)	350 °C (S) GIORNO -170 °C (S) NOTTE	-33 °C (N) 480 °C (S)	22 °C (S)	-23 °C (S)	-150 °C (N)	-180 °C (N)	-210 °C (N)	-220 °C (N)	-230 °C (?)
PRESSIONE ATMOSFERICA ALLA SUPERFICIE (MILLIBAR)	10^{-9}	90 000	1000	6	?	?	?	?	?
GRAVITÀ ALLA SUPERFICIE (TERRA = 1)	0,37	0,88	1	0,38	2,64	1,15	1,17	1,18	?
DIAMETRO APPARENTE MEDIO DEL SOLE VISTO DAL PIANETA	1°22′40″	44′15″	31′59″	21′	6′09″	3′22″	1′41″	1′04″	49″
SATELLITI NOTI	0	0	1	2	13	10	5	2	0
SIMBOLO	☿	♀	⊕	♂	♃	♄	⛢	♆	♇

La tabella nella pagina a fronte compendia le principali proprietà dei pianeti. Il disegno in alto illustra le dimensioni dei pianeti rispetto al Sole. Il segno meno che precede il periodo di rotazione di Venere e di Urano indica che tali pianeti ruotano in direzione opposta a quella degli altri pianeti. L'eccentricità dell'orbita ellittica di un pianeta è espressa secondo l'uso come la distanza fra i due fuochi divisa per la lunghezza dell'asse maggiore. L'appiattimento equivale alla differenza fra i diametri equatoriale e polare divisa per il diametro equatoriale del pianeta. I dati presentati in questa tabella e in quella della pagina seguente sono stati tratti da numerose fonti.

questa domanda, si pose un'altra domanda: perché la Terra ha una Luna? La funzione della nostra Luna, ragionò Huygens, oltre a quella di fornire un po' di luce nelle ore notturne e di determinare le maree, è quella di aiutare i marinai nella navigazione. Se Giove ha quattro lune, su tale pianeta devono esserci molti marinai. I marinai comportano l'esistenza di navi, e quindi di vele e dunque ancora di funi. Le funi, a loro volta, implicano l'esistenza della canapa. A volte mi chiedo quanti dei nostri apprezzati ragionamenti scientifici appariranno altrettanto folli a persone che vivranno sulla Terra fra tre secoli.

Un'utile misura delle conoscenze che possediamo su un pianeta potrebbe essere costituita dal numero dei bit di informazione che individuano le caratteristiche note della sua superficie. Al tempo di Huygens una decina di bit d'informazione, ottenuti tutti per mezzo di brevi sguardi col telescopio, avrebbero potuto caratterizzare la conoscenza che l'uomo aveva della superficie di Marte. All'epoca del massimo avvicinamento di Marte alla Terra nel 1877 tale numero era salito a forse alcune migliaia di bit (se escludiamo una grande quantità di informazioni erronee, come i disegni di « canali » scoperti dall'astronomo italiano Schiaparelli che oggi sappiamo essere interamente illusori). Col moltiplicarsi delle osservazioni e con lo sviluppo della fotografia astronomica la quantità di informazioni crebbe lentamente finché l'avvento dell'esplorazione diretta del pianeta per mezzo di sonde spaziali fornì improvvisamente un'ondata di nuovi dati. Ventidue fotografie scattate nel 1965 dalla sonda *Mariner 4*, che passò in prossimità di Marte, fornirono cinque milioni di bit di informazione, una quantità paragonabile alla conoscenza fotografica precedentemente disponibile per l'intero pianeta, benché tali fotografie coprissero soltanto una piccola frazione della superficie di Marte. La doppia missione di sorvolo della superficie del pianeta, portata a compimento nel 1969 dalle sonde *Mariner 6* e *Mariner 7*, estese la copertura fotografica aumentando di un centinaio di volte il totale di bit e un ulteriore passo avanti corrispondente a un altro aumento di un fattore 100 fu realizzato nel 1971 e 1972 dalla sonda *Mariner 9*, che entrò in orbita intorno a Marte. Le fotografie fornite da *Mariner 9* della superficie di Marte corrispondono grosso modo a 10 000 volte la precedente conoscenza fotografica di Marte acquisita nell'intera storia dell'umanità. Inoltre questa sonda fornì una mole altrettanto notevole di dati spettroscopici nell'infrarosso e nell'ultravioletto.

L'enorme quantità di nuove informazioni fotografiche implica non soltanto un progresso nella copertura, ovvero nella quantità, bensì anche uno spettacolare passo avanti nella risoluzione, ossia nella qualità. Prima del viaggio di *Mariner 4* il carattere attendibile più piccolo scoperto sulla superficie di Marte era dell'ordine di varie centinaia di chilometri di diametro. Una volta portata a termine la missione di *Mariner 9* una percentuale abbastanza consistente della superficie del pianeta era stata osservata con una risoluzione effettiva di 100 metri; si era avuto in altri termini un miglioramento nella risoluzione dell'ordine di un fattore 1000 negli ultimi dieci anni e di un fattore 10 000 dall'epoca di Huygens. Solo grazie a questi miglioramenti nella risoluzione oggi conosciamo i grandi vulcani, le formazioni polari laminate, i sinuosi canali, le grandi valli profondamente incise, i campi di dune, le striature di polvere associate ai crateri e molti altri interessanti caratteri dell'ambiente marziano.

Sia la risoluzione, sia la copertura sono indispensabili per fornire un'informazione adeguata su un pianeta di esplorazione recente. Per esempio, per una sfortunata coincidenza i veicoli *Mariner 4*, *Mariner 6* e *Mariner 7* osservarono la parte più antica di Marte, fittamente ricoperta di crateri e relativamente poco interessante, mentre non dettero alcuna informazione sulla parte giovane e geologicamente attiva, corrispondente pressappoco a un terzo della superficie complessiva del pianeta, rivelata successivamente da *Mariner 9*. La vita intelligente sulla Terra non sarebbe rilevabile fotograficamente in luce solare riflessa se non con una risoluzione di almeno 100 metri; solo a questo livello infatti diventerebbe evidente la geometria urbana e agricola della nostra civiltà tecnologica. Ciò significa che se su Marte fosse esistita una civiltà paragonabile per estensione e livello alla nostra, non sarebbe stata scoperta fotograficamente fino alla missione *Mariner 9*. Non c'è alcuna ragione di attenderci che civiltà paragonabili possano esistere su altri pianeti del nostro sistema solare; quel che mi preme qui è solo richiamare l'attenzione sul fatto che noi stiamo cominciando solo ora un'esplorazione adeguata dei mondi nostri vicini.

La vitalità delle scienze planetarie, in pieno rigoglio, e il volume e il carattere particolareggiato delle scoperte recenti sono tali da impressionare chiunque assista a una riunione della Divisione per le scienze planetarie della American Astronomical Society. Nella riunione del febbraio 1975 ci furono comunicazioni sulla scoperta di vapore acqueo nell'atmosfera di Giove, di etano su Saturno, di possibili idrocarburi sull'asteroide Vesta, di una pressione atmosferica vicina a quella della Terra sul satellite di Saturno, Titano, e di impulsi radio nella gamma delle lunghezze d'onda decametriche provenienti da Saturno. Il satellite di Giove, Ganimede, è stato rilevato col radar; è stato inoltre elaborato lo spettro radio di un altro satellite di Giove, Callisto. Nuove spettacolari immagini di Giove e di Mercurio e delle loro magnetosfere sono state fornite da *Pioneer 11* e da *Mariner 10*.

Tali scoperte sono importanti ed eccitanti in se stesse, ma particolarmente significative sono le loro implicazioni e interrelazioni. Ogni nuova scoperta aggiunge qualcosa al cumulo di informazioni che sono necessarie per ricostruire la storia dell'origine e dell'evoluzione del sistema solare. Sta ora divenendo evidente che ogni nuova informazione su un qualsiasi pianeta o satellite contribuisce a migliorare la conoscenza che abbiamo degli altri. In particolare, per poter capire a fondo la storia della Terra, dobbiamo avere una vasta conoscenza di quella degli altri pianeti. Mi sia consentito di dare alcuni esempi di quella che potrebbe essere chiamata planetologia comparata.

Ci sono oggi prove a sostegno di un'idea che proposi per la prima volta nel 1960: ossia che le alte temperature osservate sulla superficie di Venere siano dovute a un « effetto serra » rapidamente crescente causato dall'acqua e dall'anidride carbonica presenti nell'atmosfera del pianeta che impediscono l'emissione di radiazione termica dalla superficie verso lo spazio. La temperatura alla superficie aumenta fino al punto in cui si instaura un equilibrio fra la luce del Sole che perviene alla superficie del pianeta e la radiazione infrarossa che viene emessa da questa;

NOME DEL VEICOLO	DATA DEL LANCIO	DESTINAZIONE	DATA DELL' INCONTRO	MASSIMO AVVICINAM. (CHILOMETRI)	ESITO DELLA MISSIONE
VENERA 1	12.2.1961	VENERE	—	100 000	Contatto radio perduto a 7,5 milioni di km dalla Terra.
MARINER 1	22.7.1962	VENERE	—	—	Il razzo ausiliario deviò dalla traiettoria prevista e fu distrutto per motivi di sicurezza.
MARINER 2	26.8.1962	VENERE	14.12.1962	35 000	Primo sorvolo di un altro pianeta: trovò una temperatura elevata al suolo (400 °C); nessuna prova di campi magnetici.
MARS 1	1.11.1962	MARTE	—	190 000	Contatto radio perduto a 106 milioni di km dalla Terra.
ZOND 1	2.4.1964	VENERE (?)	—	—	Contatto radio perduto meno di un mese dopo il lancio.
MARINER 3	5.11.1964	MARTE	—	—	Non riuscito il distacco dello scudo di protezione; contatto radio perduto subito dopo il lancio.
MARINER 4	28.11.1964	MARTE	14.7.1965	10 000	Primo sorvolo di Marte; trasmissione di 22 immagini televisive della superficie del pianeta.
ZOND 2	30.11.1964	MARTE	—	—	Contatto radio perduto il 2.5.1965.
VENERA 2	12.11.1965	VENERE	27.2.1966	24 000	Superò Venere ma non riuscì a trasmettere dati.
VENERA 3	16.11.1965	VENERE	1.3.1966	ATTERRATO	Primo atterraggio di un veicolo spaziale su un altro pianeta. Non riuscì a trasmettere dati.
VENERA 4	12.6.1967	VENERE	18.10.1967	ATTERRATO	Prime misurazioni in loco della temperatura, della pressione e della composizione dell'atmosfera venusiana; la sonda trasmise dati durante i 94 minuti della discesa con paracadute.
MARINER 5	14.6.1967	VENERE	19.10.1967	4000	Fornì dati sulla struttura dell'atmosfera superiore di Venere.
VENERA 5	5.1.1969	VENERE	16.5.1969	ATTERRATO	Le sonde trasmisero dati sulla pressione, la temperatura e la composizione dell'atmosfera durante la discesa con paracadute. Primo atterraggio riuscito su un altro pianeta.
VENERA 6	10.1.1969	VENERE	17.5.1969	ATTERRATO	
MARINER 6	25.2.1969	MARTE	31.7.1969	3390	Durante il sorvolo del pianeta furono ottenuti spettri dell'atmosfera nell'infrarosso e nell'ultravioletto; trasmise 76 immagini della superficie.
MARINER 7	27.3.1969	MARTE	5.8.1969	3500	Missione identica a quella di *Mariner 6;* trasmissione di 126 immagini della superficie.
VENERA 7	17.8.1970	VENERE	15.12.1970	ATTERRATO	Missione simile a quelle di *Venera 4, 5* e *6*.
MARINER 8	8.5.1971	MARTE	—	—	Lancio fallito; cadde nell'Atlantico.
MARS 2	19.5.1971	MARTE	27.11.1971	ATTERRATO	La sonda raggiunse l'orbita di Marte, il modulo di discesa si schiantò sulla superficie.
MARS 3	28.5.1971	MARTE	2.12.1971	ATTERRATO	La sonda raggiunse l'orbita di Marte e trasmise dati; il modulo operò una discesa morbida sul pianeta e trasmise per 20 secondi.
MARINER 9	30.5.1971	MARTE	13.11.1971	1395	Primo veicolo spaziale a entrare in orbita attorno a un altro pianeta, trasmise 7329 immagini della superficie, dell'atmosfera, delle nubi e dei satelliti.
PIONEER 10	3.3.1972	GIOVE	4.12.1973	131 400	Attraversata con successo la fascia degli asteroidi, analizzò il mezzo interplanetario, la magnetosfera e l'atmosfera di Giove; fu il primo veicolo spaziale a sfruttare per la traiettoria la forza gravitazionale di un pianeta e a uscire dal sistema solare.
VENERA 8	26.3.1972	VENERE	22.7.1972	ATTERRATO	Ha resistito per 50 minuti sulla superficie di Venere determinandone il contenuto radioattivo; entrato nell'atmosfera, misurò i venti e la luce del Sole che attraversa le nubi.
PIONEER 11	6.4.1973	GIOVE SATURNO	3.12.1974 (G) ?.9.1979	46 400 (G)	Secondo sorvolo di Giove; è ora avviato verso Saturno, dopo di che lascerà il sistema solare.
MARS 4 MARS 5	21.7.1973 25.7.1973	MARTE MARTE	?.1.1974 ?.1.1974	? ?	Entrati in orbita attorno a Marte, trasmisero fotografie della superficie e altri dati.
MARS 6	5.8.1973	MARTE	?.2.1974	ATTERRATO	Il modulo di discesa fallì l'atterraggio; i dati trasmessi all'ingresso nell'atmosfera suggeriscono un alto contenuto di argo.
MARS 7	9.8.1973	MARTE	—	—	Contatto radio perduto il 12.3.1974
MARINER 10	3.11.1973	VENERE MERCURIO	5.2.1974 (V) 29.3.1974 (M)	5800 (V) 700 (M)	Prima esplorazione di Mercurio; la sonda trasmise più di 8000 immagini e altri dati da Venere e Mercurio; incontrò nuovamente Mercurio il 21.9.1974 e il 16.3.1975.
VENERA 9	?.6.1975	VENERE	22.10.1975	ATTERRATO	Prima fotografia del suolo di Venere. Funzionò per 53 minuti.
VENERA 10	?.6.1975	VENERE	25.10.1975	ATTERRATO	Trasmise una fotografia del suolo e compì misure per 65 minuti.,
VIKING 1	AGOSTO 1975	MARTE	GIUGNO 1976	PREVISTO ATTERRAGGIO	Il veicolo spaziale dovrà studiare l'atmosfera e fotografare la superficie; il modulo dovrà investigare la geologia e la chimica del suolo e cercare le tracce di vita extraterrestre.
VIKING 2	SETTEMBRE 1975	MARTE	AGOSTO 1976		
MARINER 11	AGOSTO 1977	GIOVE SATURNO	1979 (G) 1981 (S)	?	Sono previsti studi comparati dei due pianeti esterni e dei loro 23 satelliti, lo studio della natura degli anelli di Saturno, l'analisi del mezzo interplanetario oltre l'orbita di Saturno e l'esecuzione di 20 000 fotografie.
MARINER 12	SETTEMBRE 1977	GIOVE SATURNO	1979 (G) 1981 (S)	?	
PIONEER 12	MAGGIO 1978	VENERE	DICEMBRE 1978	PREVISTO ATTERRAGGIO	Il veicolo che resterà in orbita dovrà studiare l'interazione dell'atmosfera col vento solare per 243 giorni; il *bus* lascerà cadere tre piccole sonde verso la superficie e trasmetterà alla Terra i dati ricevuti.
PIONEER 13	AGOSTO 1978	VENERE	DICEMBRE 1978		

Nella pagina a fronte sono elencati i veicoli spaziali interplanetari già lanciati dagli Stati Uniti e dall'Unione Sovietica e inoltre varie missioni americane che si trovano in uno stato di avanzata progettazione. Sono esclusi da tale elenco i satelliti in orbita intorno alla Terra, le missioni lunari e le sonde lanciate nello spazio interplanetario senza un obiettivo preciso.

tale elevata temperatura superficiale ha come risultato una maggiore pressione di vapore dei gas che formano la serra, ossia l'anidride carbonica e il vapore acqueo, e il processo continua finché l'intera quantità di anidride carbonica e di acqua si trovano nella fase gassosa, producendo come risultato un'elevata pressione atmosferica e una alta temperatura alla superficie. La ragione per cui Venere ha una tale superficie, assai diversa da quella terrestre, sembra indipendente dal fatto che Venere riceve un po' più di calore solare rispetto alla Terra. Se il Sole dovesse irraggiare con maggiore intensità la superficie della Terra e se le nubi dovessero diventare più fitte, la Terra potrebbe diventare una copia di questa visione classica dell'inferno? Venere potrebbe costituire un ammonimento per la nostra civiltà tecnica, la quale ha la capacità di modificare profondamente l'ambiente del nostro pianeta.

Contro le attese di quasi tutti i planetologi, Marte è risultato coperto da migliaia di canali sinuosi, tributari di canali più grandi, che hanno probabilmente un'età di due miliardi di anni. Siano stati incisi da acque superficiali o da anidride carbonica liquida, tali canali non si potrebbero essere formati nelle condizioni atmosferiche attuali; essi hanno richiesto una pressione atmosferica molto superiore e probabilmente temperature polari meno rigide di quelle attuali. I canali testimoniano pertanto che su Marte c'è stata almeno un'epoca, e forse molte epoche, in cui le condizioni climatiche sono state molto più miti di quelle attuali, e quindi che nel corso della storia del pianeta il clima ha subìto grandi variazioni. Non sappiamo se tali variazioni siano il risultato di cause interne o esterne. Se tali cause sono peculiari di Marte, diventa importante conoscere se anche la Terra, forse anche in conseguenza delle attività dell'uomo, potrebbe essere soggetta a escursioni climatiche della stessa entità di quelle che hanno avuto luogo sul pianeta rosso. Se le variazioni climatiche marziane fossero il risultato di cause esterne (per esempio variazioni nella luminosità del Sole), sarebbe estremamente interessante una correlazione fra la paleoclimatologia marziana e quella terrestre.

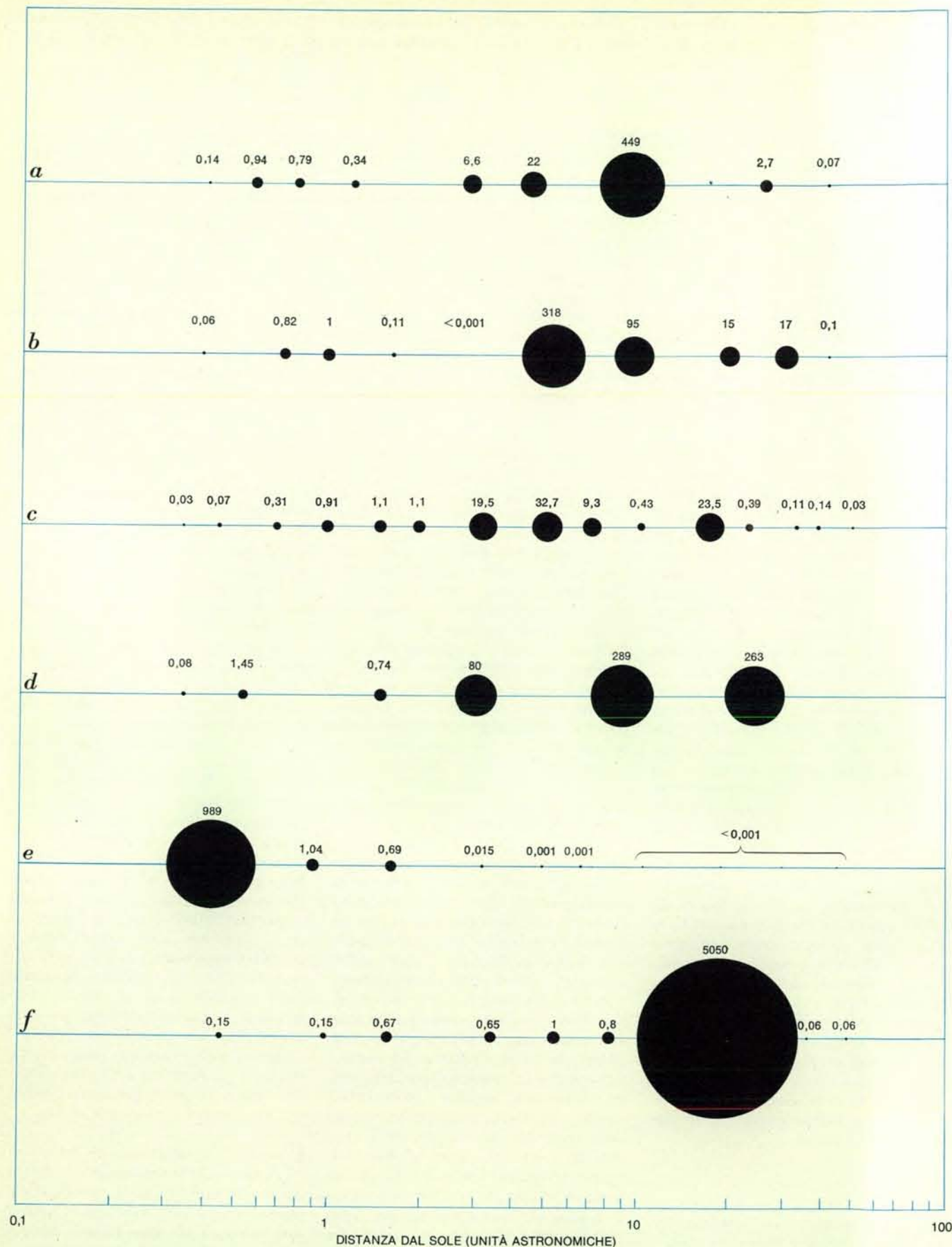
Mariner 9 arrivò in prossimità di Marte mentre era al suo culmine una grande tempesta di sabbia a livello planetario e i dati da esso forniti rendono possibile stabilire se tali tempeste facciano salire o diminuire la temperatura alla superficie di un pianeta. Una qualche teoria che pretende di predire le conseguenze climatiche di un aumento dell'abbondanza di piccole particelle nell'atmosfera terrestre avrebbe migliori prospettive di fornire la giusta risposta dopo lo studio di quella tempesta di polvere su Marte. Di fatto, attingendo alla nostra esperienza con *Mariner 9,* James B. Pollack dell'Ames Research Center della NASA e Owen B. Toon e io alla Cornell University abbiamo calcolato gli effetti di esplosioni vulcaniche singole e multiple sul clima terrestre e siamo stati in grado di riprodurre, entro i limiti dei margini d'errore sperimentali, gli effetti climatici che sono stati osservati dopo esplosioni vulcaniche reali. La prospettiva dell'astronomia planetaria, l'unica disciplina che ci consenta di considerare un pianeta nella sua globalità, pare possa fornire delle buone basi per lo studio della Terra. Un altro esempio significativo dei contributi dati dagli studi planetari ai problemi terrestri è fornito dal fatto che uno fra i gruppi principali che studiano l'effetto esercitato sullo strato di ozono che circonda la Terra dall'immissione nell'atmosfera dei propellenti al fluorocarburo liberati dalle bombolette spray è quello diretto da Michael B. McElroy della Harvard University, un gruppo che si era precedentemente dedicato allo studio dell'atmosfera di Venere.

Da osservazioni condotte mediante apparecchiature montate a bordo di veicoli spaziali oggi conosciamo qualcosa circa il numero dei crateri d'impatto di varie dimensioni esistenti su Mercurio, sulla Luna, su Marte e i suoi satelliti mentre gli studi in corso e i dati trasmessi dalle sonde cominciano a fornire informazioni analoghe anche per Venere. Benché la superficie della Terra sia stata alterata in modo massiccio dal vento e dall'acqua e da pieghe e faglie nella crosta, possediamo qualche informazione anche su analoghi crateri che si trovano sulla superficie della Terra. Se la natura dei corpi che hanno prodotto tali crateri d'impatto fosse la stessa per tutti questi pianeti, si potrebbe elaborare la cronologia assoluta e relativa delle varie superfici ricoperte da crateri. La difficoltà consiste nel fatto che non sappiamo ancora se gli oggetti che hanno causato la produzione di crateri derivino tutti da una fonte comune (per esempio, la fascia degli asteroidi) o siano di origine locale (per esempio, anelli di detriti spazzati via nella fase finale dell'accrezione dei pianeti).

Gli altopiani lunari fittamente ricoperti da crateri ci parlano di un'epoca remotissima, alle origini della storia del sistema solare, quando la frequenza degli urti che davano origine a crateri era molto più elevata di quella attuale; la quantità di detriti interplanetari attuali è del tutto insufficiente a spiegare una densità di crateri anche molto minore di quella degli altopiani della Luna. I mari lunari, d'altra parte, presentano una densità di crateri molto inferiore, la quale potrebbe essere spiegata abbastanza bene dai detriti interplanetari attuali: per lo più asteroidi e forse comete estinte. Per le superfici planetarie che non presentano un numero enorme di crateri è possibile eseguire una stima approssimativa dell'età assoluta, una stima molto più precisa dell'età relativa e in certi casi si può anche azzardare un'ipotesi circa le dimensioni dei corpi il cui impatto determinò la formazione dei crateri. Su Marte, per esempio, troviamo che i fianchi di grandi montagne vulcaniche sono quasi privi di crateri da impatto; ciò consente di concludere che essi sono relativamente recenti, esistendo da un tempo non abbastanza lungo per aver potuto accumulare molte tracce di urti. È questa la ragione che depone a favore dell'ipotesi di un vulcanismo marziano relativamente recente.

L'obiettivo ultimo della planetologia comparata è, si potrebbe dire, qualcosa di simile a un grande programma per calcolatore con il quale inserendo pochi parametri iniziali (per esempio la massa iniziale, la composizione e il momento angolare di un protopianeta e della popolazione degli oggetti vicini che lo colpiscono), possiamo ottenere la completa storia evolutiva del pianeta. Attualmente siamo ancora lontani da una comprensione così approfondita dell'evoluzione planetaria, ma siamo molto più vicini a un tale livello di conoscenza di quanto non fosse possibile immaginare solo pochi decenni fa.

Ogni nuova scoperta pone inoltre una serie di domande a cui non siamo stati finora in grado di dare una risposta. Mi limiterò a elencarne alcune.

Le prime osservazioni sui crateri di Venere con le tecniche radar hanno dimostrato che essi sono estremamente poco profondi. Sulla superficie di Venere non c'è acqua allo stato liquido che potrebbe spiegare fenomeni di erosione e l'atmosfera inferiore sembra muoversi così lentamente che i suoi venti non possono essere abbastanza forti da riempire di polvere i crateri. I crateri venusiani

Taluni sistemi planetari alternativi sono stati calcolati dall'autore e dal suo collega Richard Isaacman, della Cornell University, sulla base di un modello teorico suggerito da Stephen H. Dole della Rand Corporation. Le ipotesi che sono alla base di tali calcoli sono oggi probabilmente troppo semplicistiche, ma riteniamo che il lavoro sia comunque interessante. I numeri posti sopra gli ipotetici pianeti indicano la massa in multipli della massa della Terra che è uguale a uno. La scala orizzontale indica il semiasse maggiore delle orbite ellittiche dei vari pianeti. Il sistema contrassegnato dalla lettera *b* è il nostro sistema solare.

potrebbero essere stati riempiti dal lento disfacimento di pareti fuse molto leggere, come una colata di bitume?

La spiegazione più diffusa per la generazione di campi magnetici planetari invoca correnti di convezione indotte dalla rotazione in un nucleo planetario dotato di elevata conducibilità elettrica. Per Mercurio, che compie una rotazione lentissima, in 59 giorni, ci si attendeva che non avesse un campo magnetico rilevabile, ma *Mariner 10* dimostrò che non è così. Evidentemente si impone una seria revisione della teoria della genesi del magnetismo planetario.

Solo Saturno possiede anelli. Perché?

Su Marte c'è una serie di dune di sabbia longitudinali, inerpicate lungo il margine interno del grande cratere Procter, che presenta evidenti tracce di erosione. Nel Colorado, nel Great Sand Dunes National Monument (Monumento nazionale delle grandi dune di sabbia), esistono dune analoghe. Le dune marziane e quelle terrestri hanno la medesima estensione totale, lo stesso intervallo fra una duna e l'altra e la stessa altezza. Eppure la pressione dell'atmosfera marziana è soltanto un duecentesimo della pressione dell'atmosfera terrestre, cosicché i venti che si richiedono per sospingere i granelli di sabbia devono essere dieci volte più impetuosi di quelli che soffiano sulla Terra; inoltre la distribuzione delle dimensioni delle particelle di sabbia potrebbe essere del tutto diversa sui due pianeti. Com'è dunque possibile che i campi di dune prodotti da sabbia sollevata dal vento siano così simili?

Osservazioni compiute mediante apparecchiature installate su *Mariner 9* suggeriscono che almeno talvolta i venti raggiungono su Marte una velocità pari alla metà della velocità del suono. Avviene mai che i venti siano molto più forti? E, in tal caso, qual è la natura di una meteorologia transonica?

Su Marte ci sono piramidi aventi una base di circa tre chilometri di lato e un'altezza di un chilometro. Non è probabile che esse siano state costruite da faraoni marziani. Il ritmo dell'accumulo di sabbia su Marte a opera dei granelli trasportati dal vento è forse 10 000 volte maggiore di quello che si osserva sulla Terra a causa delle maggiori velocità necessarie per muovere particelle nella più rarefatta atmosfera marziana. Le facce delle piramidi marziane potrebbero essere il risultato di fenomeni di erosione eolica esercitata nel corso di milioni di anni mediante lo sfregamento di granelli di sabbia trasportati da venti spiranti da più di una direzione prevalente?

Quasi certamente i satelliti dei pianeti esterni non sono copie del nostro satellite, che è piuttosto monotono. Molti di essi hanno una densità così bassa da suggerire che siano composti in gran parte da metano, ammoniaca o acqua ghiacciati. Quale sarà l'aspetto della superficie? Potrebbero esservi vulcani che emettono ammoniaca liquida? Perché Io, il grande satellite di Giove che si muove nell'orbita più interna, è avvolto in una nube di sodio gassoso? Perché una faccia del satellite di Saturno, Giapeto, è sei volte più brillante dell'altra? Forse a causa di una differenza nelle dimensioni delle particelle? O di una differenza chimica? In che modo tali differenze hanno avuto origine e perché si sono imposte su Giapeto e in modo così simmetrico, cosa che non è avvenuta in nessun altro corpo del sistema solare? Il peso specifico del satellite più grande di Saturno, Titano, è abbastanza piccolo e la temperatura della parte superiore dell'atmosfera abbastanza grande perché l'idrogeno contenuto nell'atmosfera fugga rapidamente nello spazio. Eppure la spettroscopia ci rivela che su Titano rimane una quantità notevole di idrogeno.

Le nostre conoscenze sul sistema solare al di là di Saturno sono ancora pressoché inesistenti. I nostri telescopi sono stati impari al compito di determinare in modo attendibile perfino i periodi di rotazione di Urano, Nettuno e Plutone, per non parlare del carattere delle loro nubi e della loro atmosfera e della natura dei loro satelliti.

Uno fra i problemi affascinanti e complessi, che solo oggi si comincia ad affrontare in modo approfondito, è quello della chimica organica e della biologia su corpi del sistema solare che non siano la Terra. Ancora del tutto aperto è il problema dell'esistenza o meno di organismi grandi e piccoli, in particolare su Marte. L'ambiente marziano non è affatto così ostile da escludere la vita, ma non sappiamo ancora abbastanza circa l'origine e l'evoluzione della vita per essere certi della sua presenza su Marte o su qualsiasi altro corpo celeste. I tre esperimenti di microbiologia, l'esperimento di chimica organica e i sistemi fotografici a bordo dei due veicoli Viking il cui atterraggio su Marte è previsto per la prossima estate potranno fornirci le prime prove sperimentali in proposito. Le atmosfere ricche di idrogeno di corpi come Giove, Saturno, Urano e Titano sono simili, per taluni aspetti significativi, all'atmosfera della Terra nel periodo in cui ebbe origine la vita. Da esperimenti di simulazione in laboratorio sappiamo che in tali condizioni la sintesi di molecole organiche ha luogo in gran quantità. (Nell'atmosfera di Giove, come in quella di Saturno, tali molecole sarebbero trasportate dalla convezione a profondità in cui verrebbero decomposte dal calore, ma anche là la concentrazione di molecole organiche potrebbe essere significativa.) In tutti gli esperimenti di simulazione l'applicazione di energia a tali atmosfere produce un materiale polimerico di color bruno che assomiglia per molti aspetti alla sostanza che dà una colorazione brunastra alle nubi di Giove e di Saturno. Titano potrebbe essere interamente ricoperto da un materiale organico di tale colore.

Il mezzo principale per proseguire l'esplorazione del sistema solare nella prossima ventina d'anni sarà costituito sicuramente da missioni planetarie automatiche. Veicoli spaziali scientifici sono già stati lanciati con successo verso tutti i pianeti noti agli antichi. Anche se solo una piccola parte delle missioni che sono state progettate e proposte sono oggi un fatto compiuto, è chiaro che la presente età aurea dell'esplorazione planetaria è destinata a continuare.

Eppure nemmeno una ricognizione preliminare dell'intero sistema solare fino a Plutone e l'esplorazione più particolareggiata di alcuni pianeti (per esempio a opera di veicoli che percorrano la superficie di Marte o che penetrino all'interno dell'atmosfera di Giove) risolveranno il problema fondamentale delle origini del sistema solare. A tal fine abbiamo bisogno di scoprire altri sistemi solari, magari in varie fasi della loro evoluzione. I progressi compiuti nella strumentazione installata a Terra o alloggiata su sonde spaziali hanno reso possibile scoprire decine di sistemi planetari che orbitano intorno a singole stelle relativamente vicine. Recenti studi e osservazioni a opera di Helmut Abt e Saul Levy del Kitt Peak National Observatory suggeriscono che una stella su tre ha dei pianeti. Non sappiamo se tali sistemi siano simili al nostro o se siano costruiti su principi molto diversi. Richard Isaacman, della Cornell University, e io abbiamo calcolato una serie di possibili sistemi planetari fondati su un modello teorico suggerito in origine da Stephen H. Dole, della Rand Corporation. Gli assunti che sono alla base di questi modelli sono così semplici da farci credere che siano utopistici, eppure la varietà di sistemi a cui essi danno origine è affascinante. Potrebbe non essere molto lontano il tempo in cui avremo informazioni dirette, desunte dall'osservazione, sulla distribuzione nello spazio di vari tipi di sistemi planetari. Potremo allora ripetere, con Huygens: « Quale mirabile e affascinante disegno abbiamo qui della splendida vastità dell'universo! Innumerevoli soli, innumerevoli terre! »

I pianeti esterni

Oltre Giove si trovano pianeti lontani e inesplorati: Saturno, Urano, Nettuno e Plutone. Saturno ha composizione molto simile a Giove; Urano e Nettuno sembrano più rocciosi; Plutone ha un'orbita particolare

di Donald M. Hunten

I cinque pianeti esterni del sistema solare differiscono in modo radicale dagli altri quattro. I pianeti interni, Mercurio, Venere, la Terra e Marte, hanno all'incirca le stesse dimensioni e presentano tutti un'elevata densità. Giove, Saturno, Urano e Nettuno si distinguono invece per le enormi dimensioni e la bassa densità. Plutone, il pianeta più esterno, è grande più o meno come Mercurio e ha la caratteristica insolita di un'orbita inclinata di 17 gradi rispetto al piano centrale medio del sistema solare: nessun altro pianeta ha infatti un'inclinazione dell'orbita superiore a sette gradi. Giove è trattato nell'articolo precedente; qui mi occuperò di ciò che si conosce della natura dei quattro pianeti esterni a Giove.

Saturno, che è il sesto in ordine di distanza dal Sole, era fino al XVIII secolo il pianeta più distante conosciuto. Ha luce di colore giallastro ed è più luminoso della maggior parte delle stelle. Urano, il settimo pianeta, fu scoperto nel 1781 da William Herschel che lo trovò osservando il cielo con il telescopio: subito si accorse che era un pianeta e in pochi giorni riuscì perfino a osservarne il moto.

La scoperta di Nettuno costituisce insieme uno dei grandi trionfi della meccanica celeste e un interessante studio psicologico. Nel 1841 John Couch Adams, allora studente a Cambridge, intraprese i calcoli per dimostrare che un pianeta sconosciuto era la causa delle perturbazioni riscontrate nel moto di Urano. I suoi risultati, comunicati quattro anni più tardi, non furono tenuti in grande considerazione e nessuno si mise a cercare un pianeta nella posizione da lui prevista. Si iniziò invece una ricerca su un'estesa parte del cielo e i ritardi nell'interpretazione dei dati fecero perdere l'occasione della scoperta del pianeta. Nel frattempo in Francia anche Urbain Leverrier si era occupato del problema, giungendo nel 1845 a pubblicare i suoi calcoli, che davano una posizione del pianeta quasi identica a quella di Adams, ma anch'egli non fu ascoltato e non riuscì a convincere gli astronomi di Parigi a interrompere le altre osservazioni. Scrisse così finalmente a Berlino al giovane astronomo Johann Gottfried Galle, il quale trovò il pianeta al primo tentativo il 23 settembre 1846, a meno di mezzo grado dalla posizione prevista.

Ai ricercatori che oggi si occupano dei pianeti la storia della scoperta di Urano sembra ricordare in modo curioso la loro esperienza.

Gran parte degli astronomi si interessano infatti esclusivamente di stelle e di galassie per cui sono riluttanti a lasciare che i loro telescopi vengano «sprecati» per i pianeti; in parte è anche questa la ragione per cui la NASA ha finanziato la costruzione di quattro nuovi grandi telescopi, uno in Arizona, uno nel Texas e due nelle Hawaii.

La scoperta di Plutone per certi aspetti è simile a quella di Urano e Nettuno. L'analisi delle perturbazioni dei moti di Urano e Nettuno portò W.H. Pickering e Percival Lowell all'inizio di questo secolo a prevedere l'esistenza di un pianeta al di là di Nettuno e la ricerca fotografica che Milton Humason effettuò presso l'osservatorio del Monte Wilson avrebbe condotto alla scoperta del pianeta se non fosse stato per un doppio colpo di sfortuna: molti anni più tardi si scoprì infatti che due delle fotografie prese da Humason mostravano in effetti l'immagine di Plutone, ma purtroppo in una il pianeta era nascosto da un difetto della lastra, e nell'altra era oscurato dalla vicinanza di una stella luminosa. I ricercatori del Lowell Observatory di Flagstaff nell'Arizona, che è stato fondato proprio per lo studio dei pianeti, organizzarono molte osservazioni, tutte infruttuose. Finalmente nel 1929 si costruì al Lowell Observatory uno speciale telescopio per la ricerca del pianeta che si trovava al di là di Nettuno, il quale, nel febbraio del 1930, fu scoperto da Clyde W. Tombaugh a circa cinque gradi dalla posizione prevista. Ora sembra però che la massa di Plutone sia assolutamente troppo piccola per provocare le perturbazioni riscontrate nei moti di Urano e Nettuno che hanno fatto inizialmente prevedere la sua esistenza. In altre parole, i calcoli che hanno condotto alla scoperta di Plutone erano sbagliati.

Se la scoperta dei pianeti più esterni è stata difficile, ancora più arduo si è mostrato lo studio della loro natura fisica. A eccezione delle osservazioni effettuate dai due Pioneer che hanno viaggiato verso Giove, la fisica dei pianeti esterni è stata finora studiata con i metodi classici dell'astronomia. Tuttavia l'esplorazione dello spazio ha avuto indirettamente un forte effetto per cui nell'ultimo decennio trascorso c'è stato un rifiorire dell'astronomia planetaria e il solo fatto di mettere in programma future missioni ha dato stimolo a tutta una serie di progressi nelle osservazioni e negli studi.

Per l'estrema lontananza dal Sole i

La fotografia di Saturno nella pagina a fronte è un mosaico di 16 immagini prese da Stephen M. Larson con il telescopio riflettore di 155 centimetri presso il Catalina Observatory in Arizona. Gli anelli, che si trovano direttamente sopra l'equatore, e la calotta scura sul polo sud sono inclinati di 26,9 gradi rispetto alla visuale. L'inclinazione dell'asse del pianeta visto dalla Terra cambia per cui si vedono alternativamente ogni 30 anni l'emisfero meridionale e l'emisfero settentrionale. Il largo spazio scuro tra gli anelli è detto divisione di Cassini. La superficie di Saturno appare giallastra, con evidenti fasce più scure lungo i paralleli, delle quali la più appariscente è quella situata in prossimità dell'equatore. Gli anelli sono in parte oscurati dall'ombra del pianeta.

Urano, fotografato da un telescopio installato su pallone all'altezza di 24 chilometri nell'atmosfera terrestre, non mostra dettagli visibili della superficie. Se anche ci fossero deboli fasce o altre caratteristiche, esse non avrebbero un contrasto di luminosità superiore al 5 per cento. Questa fotografia è la sintesi di 17 immagini prese durante il volo di *Stratoscope II* nel 1970 e combinate con l'ausilio del calcolatore presso la Princeton University da R. E. Danielson, M. Tomasko e B. Savage.

In questa fotografia, ottenuta con il telescopio riflettore da 300 centimetri presso il Lick Observatory in California, è visibile non solo Nettuno, ma anche Tritone, il più grande dei due satelliti di questo pianeta.

Plutone, il pianeta più esterno, visibile al centro di questa fotografia eseguita con il telescopio da 500 centimetri di Monte Palomar, è così debole che non si può studiare con le tecniche ottiche e spettroscopiche tradizionali. Le misure fotometriche però rivelano che la sua luminosità varia del 20 per cento ogni 6,39 giorni; questo fenomeno è probabilmente dovuto alla rotazione del pianeta e alla variazione delle caratteristiche della superficie.

pianeti esterni ricevono solo una piccola quantità di luce e di calore e la debole luce che essi riflettono contribuisce a complicare l'analisi al telescopio delle loro caratteristiche. Giove, che è il pianeta esterno di più facile osservazione, e Saturno mostrano chiaramente di possedere un'atmosfera densa e molto nuvolosa; qualche osservatore sostiene che Urano possiede deboli bande che indicano la presenza di un'estesa atmosfera. Benché l'osservazione di Nettuno sia estremamente difficile anche con i telescopi più grandi, sembra che anche questo pianeta possieda un'estesa atmosfera. Le osservazioni fotometriche indicano inoltre che il pianeta non presenta variazioni periodiche di luminosità e, essendo quasi impossibile che un corpo rotante con una superficie solida visibile non abbia variazioni di luminosità, questo suggerisce che Nettuno possieda un'atmosfera. Plutone, al contrario, ha variazioni di luminosità del 20 per cento circa su un periodo di 6,39 giorni, presumibilmente causate dalla rotazione del pianeta e dalle diverse caratteristiche della sua superficie.

La misura del tempo di occultazione, o eclisse, di una stella da parte di un pianeta può dare precise informazioni sulle sue dimensioni. Per misurare la scomparsa e la ricomparsa di una stella dietro il pianeta si usano fotometri ad alta sensibilità. Nel 1965 si osservò una parziale occultazione dovuta a Plutone, i risultati della quale indicano che il diametro del pianeta non può superare i 5800 chilometri (il diametro della Terra è di 12 756 chilometri). In Giappone, Australia e Nuova Zelanda nel 1968 alcuni astronomi effettuarono eccellenti misure dell'occultazione di una stella da parte di Nettuno e ottennero il nuovo valore di 49 500 chilometri per il diametro del pianeta. Purtroppo non è stato ancora possibile osservare stelle occultate da Saturno e Urano.

L'osservazione al telescopio dei pianeti più distanti è limitata, oltre che dalla scarsità della luce che essi riflettono, anche dalla turbolenza dell'atmosfera terrestre. Il programma spaziale ha dato impulso allo sviluppo dell'uso dei palloni per portare i telescopi fino alla stratosfera e riuscire così a eliminare la confusione nell'immagine dovuta agli strati inferiori dell'atmosfera. Nel 1970 un telescopio installato su un pallone ottenne fotografie di Urano con una risoluzione di 0,15 secondi d'arco, che è circa dieci volte migliore della migliore risoluzione che si ha con i telescopi situati a Terra (*si veda l'illustrazione in alto a sinistra*). Da queste fotografie Robert E. Danielson, Martin Tomasko e Blair Savage della Princeton University determinarono che il diametro di Urano è di 51 800 chilometri.

Poiché il volume di un pianeta è proporzionale al cubo del suo raggio, l'accuratezza nella misura del diametro è di importanza critica. Un piccolo cambiamento nella misura del diametro o del raggio porta a una grande variazione del volume. La densità media del pianeta, una caratteristica di fondamentale importanza per la sua composizione globale e la sua struttura interna, si ottiene dividendo la massa del pianeta per il suo volume. La massa si può calcolare dal periodo orbitale dei suoi satelliti o dalle perturbazioni che si notano nei moti dei pianeti vicini. Saturno, Urano e Nettuno hanno tutti satelliti che rendono possibili misure precise della massa e della densità media del pianeta. Plutone invece non ha satelliti ed essendo troppo piccolo per provocare effetti misurabili sulle orbite dei pianeti vicini molto più grandi, risulta estremamente difficile determinarne la massa. La migliore stima dà un valore di circa un decimo della massa terrestre, ma l'errore probabile è in effetti più grande della stima. Poiché di Plutone non si conosce con sicurezza nemmeno il raggio, anche la densità media non è nota per cui i valori solitamente riportati si devono considerare solo delle congetture (*si veda la tabella in alto nella pagina a fronte*).

È stato difficile determinare il periodo di rotazione di Urano e Nettuno in quanto questi pianeti appaiono nel telescopio sotto forma di un disco così piccolo che in esso è impossibile osservare le caratteristiche della superficie. Le misure dello spostamento Doppler delle linee spettrali dei bordi del disco, uno in avvicinamento e l'altro in recessione, di ciascun pianeta, danno un periodo di rotazione di 11 ore per Urano e di 16 ore per Nettuno, ma questi sono valori incerti. A differenza di tutti gli altri pianeti, Urano ha l'asse di rotazione che giace approssimativamente nel piano dell'orbita. Accurati studi delle caratteristiche della superficie di Saturno hanno dato un periodo di rotazione di 10,2 ore.

La composizione atmosferica dei pianeti esterni è stata studiata principalmente attraverso gli spettri di emissione e di assorbimento. Lo spettro di assorbimento della luce solare riflessa da un pianeta fornisce la prova della presenza e dell'abbondanza dei diversi gas, i quali assorbono luce di differenti lunghezze d'onda. Lo spettro di emissione invece mette in evidenza l'emissione termica propria del pianeta.

L'atmosfera di Urano è particolarmente trasparente e la luce del Sole può penetrarvi parecchio prima di essere riflessa; il suo spettro di assorbimento mostra in forte evidenza le bande del metano, il

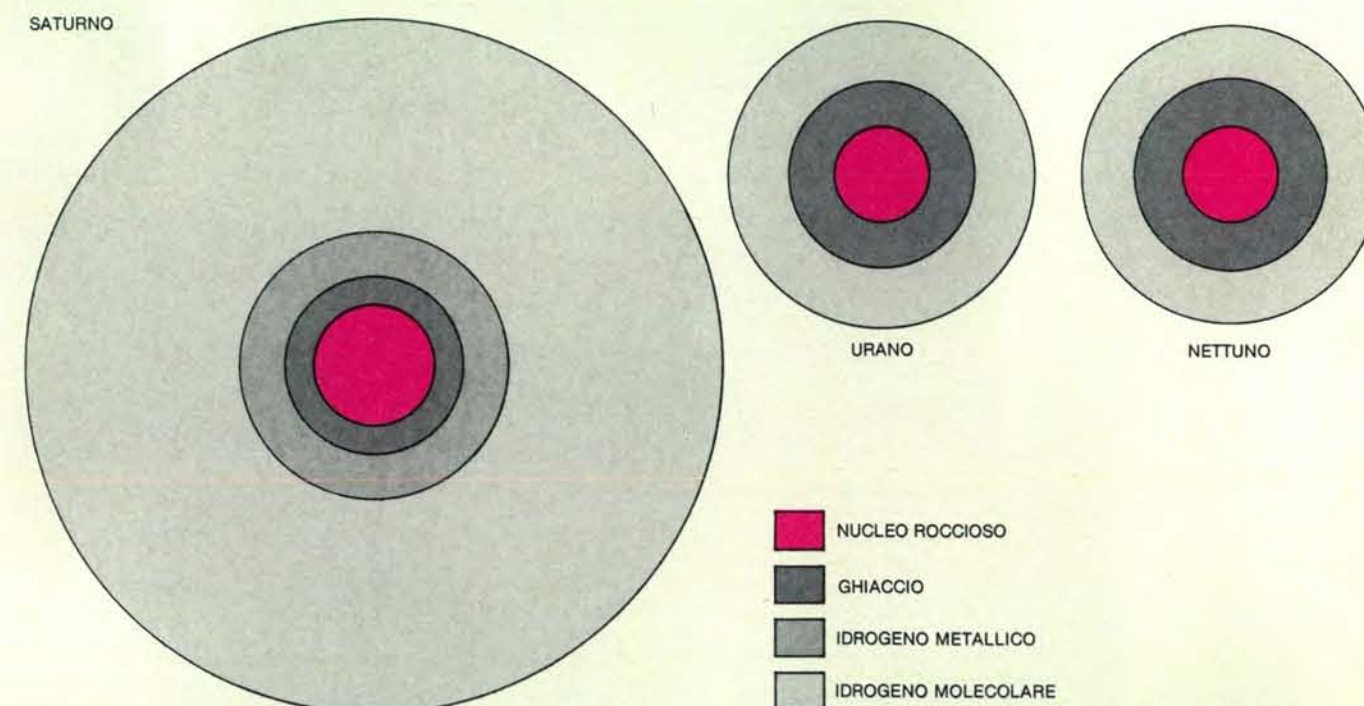
	DISTANZA DAL SOLE (UNITA' ASTRONOMICHE)	CALORE SOLARE	TEMPERATURA (KELVIN)		DIAMETRO (CHILOMETRI)	MASSA	DENSITÀ (ACQUA = 1)	PERIODO DI ROTAZIONE (ORE)
			DI EQUILIBRIO	EFFETTIVA				
TERRA	1	1000	246	290	12 756	1	5,52	24
GIOVE	5,2	37	105	135	142 800	318	1,314	9,9
SATURNO	9,54	11	71	97	120 000	95	0,704	10,2
TITANO	9,54	11	82	130?	5800	0,023	1,34	16 GIORNI
URANO	19,2	2,7	57	—	51 800	14,6	1,21	11
NETTUNO	30,1	1,1	45	—	49 500	17,2	1,67	16
PLUTONE	39,4	0,64	42	—	5800?	0,1?	2?	6,39 GIORNI

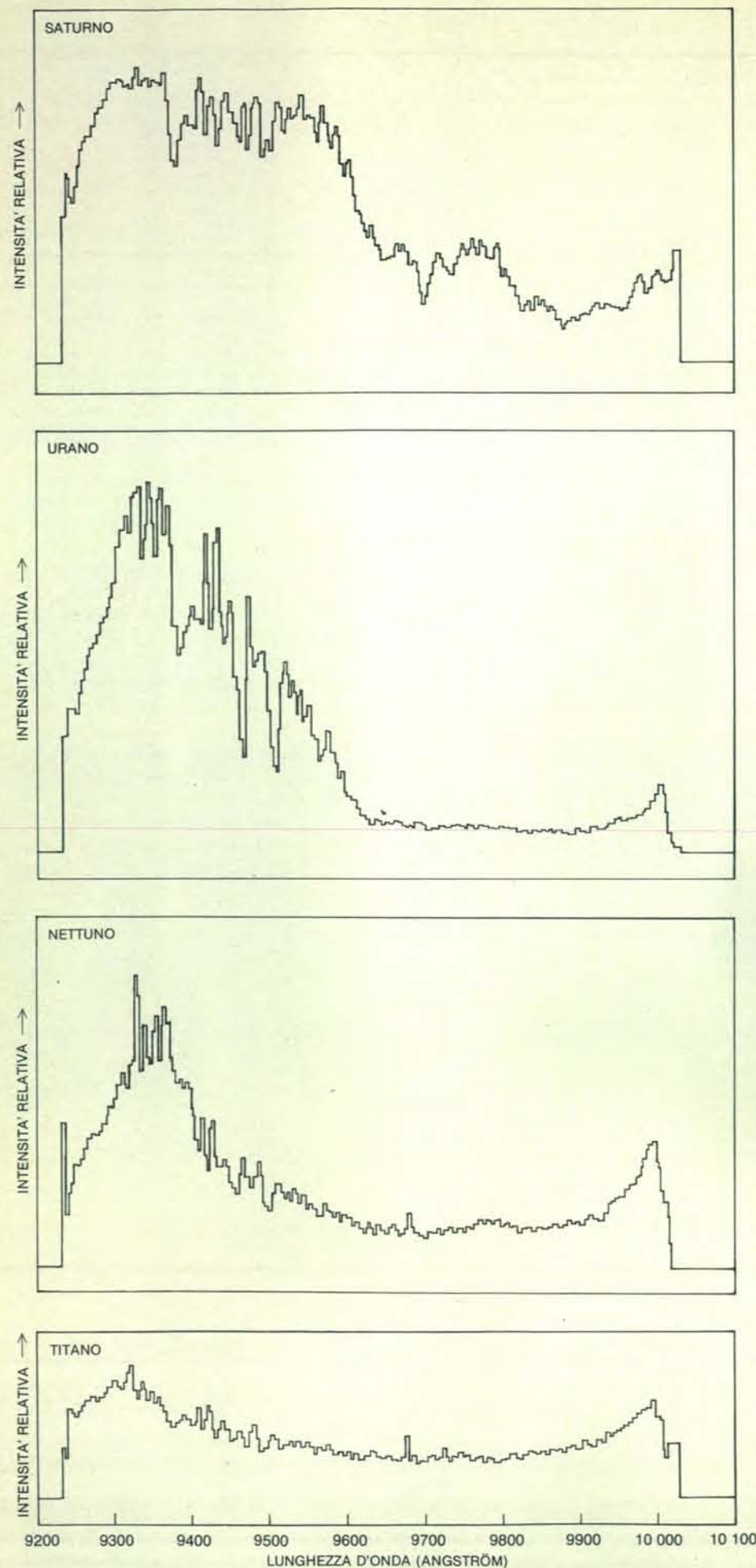
Caratteristiche generali dei pianeti esterni e del satellite di Saturno, Titano, confrontate con quelle della Terra. Si noti la debolezza della radiazione che essi ricevono dal Sole. Le temperature di equilibrio si ricavano dalla quantità di calore solare assorbita dai pianeti. Giove e Saturno irradiano molta più energia termica di quanta non ne assorbano, quindi devono possedere qualche fonte interna di calore. La temperatura effettiva riportata per la Terra si riferisce alla superficie che, essendo riscaldata dall'« effetto serra » dell'atmosfera, finisce con l'irradiare un'energia effettiva molto vicina a quella che essa riceve dal Sole.

che indica una forte abbondanza di questo gas, che può anche essere presente sotto forma di nuvole. Anche Nettuno ha atmosfera trasparente e forte assorbimento di metano, mentre Saturno ha un assorbimento più debole (*si veda l'illustrazione a pagina 112*).

Le bande di ammoniaca, chiaramente presenti nello spettro di assorbimento di Giove, non sempre ci sono negli spettri di Saturno e sono assenti in quelli di Urano e Nettuno: la spiegazione probabile è che la loro temperatura, essendo inferiore, provoca nubi di ammoniaca più in basso nell'atmosfera, dove non si riesce a osservarle. Anche se Saturno non mostra un chiaro spettro di assorbimento dell'ammoniaca, le nubi chiaramente visibili nelle fotografie sono probabilmente costituite da ammoniaca.

L'idrogeno è il gas più abbondante sui pianeti esterni, ma assorbendo molto poco la luce, è difficile da individuare negli spettri. L'assorbimento di idrogeno è evidente per Saturno e Urano, e si pensa che sia presente anche su Nettuno. Anche se l'elio non assorbe affatto la luce, esso è presente sui pianeti esterni probabilmente con la stessa abbondanza che ha sul Sole: un atomo di elio per ogni dieci molecole di idrogeno.

Titano, a rigore, è un satellite di Saturno, ma qui è più corretto considerarlo come pianeta. È infatti grande più di Mercurio e quasi come Marte, del quale ha per giunta un'atmosfera più estesa. Gerard P. Kuiper dell'Università di Chicago ha scoperto il metano nello spettro di assorbimento di Titano nel 1944. Recentemente Laurence M. Trafton dell'Università del Texas ha riesaminato i risultati di Kuiper e ha trovato che la pressione atmosferica alla superficie del satellite dovrebbe essere almeno quattro volte quella di Marte; se poi insieme al metano c'è un altro gas non visibile, ci si può aspettare anche una pressione analoga a quella della superficie terrestre. In base al suggerimento di John S. Lewis del Massachusetts Institute of Technology,

Sezioni della struttura interna di Saturno, Urano e Nettuno. Questi modelli sono derivati dall'ipotesi che i pianeti si siano inizialmente formati per accrezione di materiali rocciosi e di ghiacci e poi per accumulo di gas. Il nucleo roccioso di Saturno, che ha un diametro di 20 000 km, è circondato da uno strato di ghiacci spesso 5000 km e da uno di idrogeno metallico di 8000 km. Urano e Nettuno hanno ciascuno un nucleo di 16 000 km circondato da uno strato di 8000 km di ghiaccio.

Spettri di assorbimento nell'infrarosso di Saturno, Urano, Nettuno e Titano ottenuti recentemente con uno spettrografo sperimentale al telescopio di 400 centimetri del Kitt Peak National Observatory. L'assorbimento dovuto al metano, evidente tra 9600 e 10 000 angström, è più forte per Urano, Nettuno e Titano che per Saturno.

ho avanzato l'ipotesi che il gas invisibile possa essere azoto formatosi dall'ammoniaca (NH_3) per effetto della radiazione solare. Anche Trafton nello spettro di assorbimento di Titano ha trovato tracce d'idrogeno, il quale potrebbe avere la stessa abbondanza del metano.

Gli strati più alti dell'atmosfera terrestre contengono ozono e quindi sono riscaldati dalla radiazione ultravioletta assorbita da questo gas. Pare che anche su Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Titano ci sia un analogo processo di riscaldamento, ma dovuto a differenti sostanze assorbenti. Una delle sostanze più probabili è il metano, che innalzerebbe la temperatura degli strati più alti dell'atmosfera di 70 o 80 kelvin, come L.W. Wallace e i suoi colleghi del Kitt Peak National Observatory hanno dimostrato.

Su Giove, Saturno e Titano anche lo «smog» costituito da piccole particelle scure in sospensione nell'atmosfera può contribuire a elevarne la temperatura. La presenza di smog è dimostrata dal fatto che questi corpi non assorbono la radiazione ultravioletta come dovrebbero in base alla sola composizione chimica dell'atmosfera. Non si sa da dove abbiano origine queste particelle scure, ma potrebbero essersi formate per aggregazione di molecole di metano in polimeri sotto l'effetto della radiazione solare. Le particelle assorbirebbero così la luce del Sole e scambierebbero calore con il gas circostante.

Le molecole del gas presente nella stratosfera planetaria calda emettono radiazioni infrarosse facilmente rivelabili. Per Saturno lo spettro di emissione mostra la presenza non solo di metano, ma anche di un composto formato da etano, etilene e acetilene. Il composto è probabilmente prodotto dalla polimerizzazione, causata dalla radiazione solare, del metano.

Anche su Nettuno sembra che esista una stratosfera calda. L'analisi dei dati dell'occultazione stellare da parte di Nettuno del 1968 porta a pensare che la temperatura degli strati superiori dell'atmosfera possa arrivare anche a 140 kelvin. L'emissione di Titano nell'infrarosso è simile a quella di Saturno, il che indica che pure Titano possiede una stratosfera calda.

Gli anelli di Saturno sono tra i più affascinanti oggetti visibili al telescopio. Più di un secolo fa James Clerk Maxwell concluse che essi erano costituiti da piccoli corpi separati orbitanti intorno al pianeta, ma solo da pochi anni si sono compiuti progressi nella comprensione della loro natura. Nel 1970 si riuscì a ottenere uno spettro di riflessione degli anelli nel vicino infrarosso che sulle prime sembrava adattarsi allo spettro dell'ammoniaca ghiacciata, mentre subito dopo ci si rese conto che si accordava molto meglio con quello di ghiaccio a bassissima temperatura. Nel 1972 si ottennero dagli anelli echi radar la cui interpretazione più convincente, tuttavia non condivisa da tutti, è che le particelle siano pezzi di ghiaccio di diametro variabile tra i 4 e i 30 centimetri. All'analisi fotometrica degli anelli sotto differenti condizioni di illuminazione pare che la superficie degli oggetti sia più simile a neve che a ghiaccio solido.

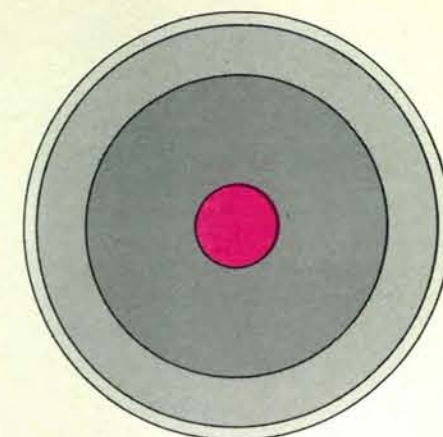
Ultimamente ci si è resi conto che dovrebbero esserci anelli gassosi in corrispondenza di qualcuno dei satelliti di Giove o di Saturno, i quali, a differenza dei loro pianeti, non sono abbastanza grandi per trattenere stabilmente l'idrogeno. Di conseguenza l'eventuale idrogeno presente su Titano sarebbe sfuggito dall'atmosfera del satellite per andare a orbitare intorno a Saturno. Se il tempo di permanenza del gas in orbita fosse abbastanza lungo, potrebbe aver formato un anello centrato sull'orbita di Titano che sarebbe un'estensione, in pratica, della sua alta atmosfera. Stime di permanenza del gas in orbita fanno pensare a una densità degli anelli molto bassa: un migliaio di molecole per centimetro cubo e anche meno. La sonda *Pioneer 10* ha dimostrato la presenza di atomi di idrogeno in prossimità di uno dei 13 satelliti di Giove, Io, la cui bassa densità conferma l'ipotesi che l'anello di Titano non sia molto denso.

Con l'aggiungersi di nuove conoscenze in questo secolo, le idee sulla natura dei pianeti esterni hanno avuto notevoli oscillazioni. A volte essi sono stati considerati dei piccoli soli in miniatura, ma le misure del calore da essi irradiato hanno fatto abbandonare questa interpretazione. Nel 1937 Rupert Wildt della Yale University avanzò l'ipotesi che Giove e Saturno, così grandi e così poco densi, dovessero essere formati essenzialmente da idrogeno e possedere un grosso nucleo di metallo e roccia racchiuso in un mantello di ghiaccio. Oggi si è più propensi a pensare che il 15 per cento circa della loro massa sia costituito da un nucleo roccioso e metallico e il resto soprattutto da idrogeno ed elio; è probabile poi che il loro interno sia caldo. Urano e Nettuno, che sono più densi, contengono una più alta percentuale di roccia e metallo, forse anche il 90 per cento.

Nel 1969 si misurò l'emissione termica di Giove e Saturno nell'infrarosso con un aeroplano in volo ad alta quota e si scoprì che entrambi emettono circa il doppio dell'energia che ricevono dal Sole. Questo fatto ha condotto a un altro capovolgimento delle idee sui giganti del sistema solare e si è riaffacciata l'ipotesi che questi pianeti contengano sorgenti di calore. Giove però irradia una potenza totale che è solo 3×10^{-7} quella del Sole, Saturno cinque volte meno ancora, mentre tuttora non si sa quanta sia l'energia termica emessa da Urano, Nettuno e Plutone.

Secondo una delle ipotesi la sorgente di energia per Giove è una leggera, ma continua, contrazione del pianeta che trasforma in calore l'energia gravitazionale. Siccome gran parte del calore si forma molto all'interno, deve in qualche modo essere trasportato fuori e l'unico meccanismo in grado di farlo è costituito da correnti termoconvettive a grandi profondità. In presenza di convezione però la materia dell'interno deve essere rimescolata piuttosto che stratificata. William B. Hubbard dell'Università dell'Arizona ha proposto un modello in cui l'interno è tutto miscelato.

Un'altra ipotesi è che Giove e Saturno stiano solo irradiando il calore accumulato nella fase di contrazione gravitazionale della loro formazione e che ora si contraggano lentamente perché stanno raffreddandosi; anche questo modello prevede importanti correnti termoconvettive nell'interno.

Le idee sulla composizione dei pianeti giganti sono strettamente connesse alle moderne ipotesi sull'origine e l'evoluzione del sistema solare (si veda l'articolo *L'origine e l'evoluzione del sistema solare*, di A.G.W. Cameron, a pagina 20). La nebulosa che ha dato origine al Sole e ai pianeti si formò per collasso di una nube interstellare. La maggior parte della materia della nebulosa confluì verso l'interno a formare il Sole, ma una parte rimase in orbita. I grandi pianeti esterni cominciarono a prendere forma per accrezione di materiale roccioso e di ghiacci che, dopo aver dato origine a nuclei rocciosi, attirò su di sé grandi quantità di elio e di idrogeno dalla nebulosa. Questo processo si spinse più avanti per Giove e Saturno, che spazzarono via praticamente tutto il gas vicino, e si fermò un po' prima per Urano e Nettuno, che per questo motivo sono più rocciosi e hanno un minor contenuto di idrogeno ed elio. I pianeti formatisi per accrezione dovrebbero avere una struttura a strati (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 111*). Probabilmente il moto convettivo necessario a trasportare all'esterno il calore ha agito diversamente nei vari strati per la grande differenza di densità

Sezione di Titano. Sembra che il nucleo sia circondato da un mantello roccioso che ingloba parecchia acqua. Il mantello potrebbe essere ricoperto da un « magma » d'acqua e ammoniaca e la crosta potrebbe essere una miscela di ghiacci e metano.

esistente, così che ogni strato sarebbe rimasto ben distinto dall'altro.

I pianeti esterni hanno una superficie solida? La risposta dipende da ciò che si intende per superficie solida. Il modello di Giove che deriva dall'ipotesi dell'accrezione prevede un nucleo roccioso, ma questo ha una temperatura di circa 20 000 kelvin e una pressione di 60 milioni di atmosfere, per cui si può considerare allo stato di liquido o di vapore estremamente compresso. Nel modello di Urano il nucleo ha una temperatura di 4000 kelvin e la pressione è superiore a due milioni di atmosfere. Qualunque altra caratteristica possiamo attribuire a questa superficie, essa è sicuramente inaccessibile

La densità media di Titano e di 2,1 grammi per centimetro cubo. Si ritiene che anch'esso possieda un nucleo metallico e roccioso circondato forse da un «magma» di acqua con ammoniaca in soluzione. La crosta potrebbe essere fatta di ghiacci, nell'interno dei quali ci sarebbero grandi quantità di metano. Se l'atmosfera fosse profonda la crosta ghiacciata potrebbe sciogliersi e formare uno strato di metano liquido galleggiante sulla soluzione di acqua e ammoniaca. Titano è un corpo celeste molto diverso da tutti gli altri noti: non assomiglia a nessuno dei pianeti interni e nemmeno ai giganti; è una specie di ibrido e la sua esplorazione non potrà che dare frutti interessanti.

I corpi minori del sistema solare

Vanno come dimensioni dalle micrometeoriti non più grandi d'un grano di sabbia a satelliti più grandi di Mercurio; molti di essi sarebbero frammenti formatisi in seguito a collisioni tra planetesimali in via di accrescimento

di William K. Hartmann

Molti restano sorpresi nell'apprendere quanti corpi simili a pianeti esistano nel sistema solare. Vi sono, per esempio, quattro corpi i cui diametri sono probabilmente maggiori del diametro di Mercurio eppure non sono annoverati tra i nove pianeti. Altri undici non pianeti sono probabilmente maggiori di qualsiasi asteroide. Questi 15 corpi sono i satelliti di vari pianeti. Vi sono in tutto 33 satelliti distribuiti tra sei dei nove pianeti; i loro diametri vanno da pochi chilometri fino a circa 6000 chilometri. Vi sono inoltre 2000 asteroidi (detti anche pianetini) abbastanza grandi, con orbite conosciute: il maggiore ha un diametro di 955 chilometri. Più di diverse migliaia di piccoli asteroidi seguono percorsi intorno al Sole meno conosciuti. Inoltre si ritiene che miliardi di comete, i cui diametri sono misurabili in decine di chilometri, percorrano orbite al di là dei pianeti esterni. Qui considereremo come sono imparentati tutti i corpi minori: i satelliti, i vari gruppi di asteroidi, inclusi i frammenti meteoritici che arrivano fino a dimensioni inferiori di un granello di sabbia, le comete ghiacciate, quegli strani detriti che formano gli anelli di Saturno e persino i granelli di polvere che condensarono prima che i pianeti cominciassero a crescere.

Fino a pochi anni fa ai corpi minori del sistema solare si è dedicata poca attenzione. Questo atteggiamento sta rapidamente cambiando. La quantità di ricerche pubblicate su questo argomento è decuplicata dal 1960. All'inizio degli anni settanta intere sezioni di vari congressi astronomici sono state dedicate alla natura fisica, all'origine e alle proprietà superficiali dei corpi minori. Nel 1971 si è tenuta una conferenza di cinque giorni all'Università dell'Arizona sugli asteroidi e nel 1974 i satelliti sono stati il tema di un simposio alla Cornell University.

Non è difficile trovare le ragioni di un simile orientamento. Molti dei corpi minori sono stati scoperti più di un secolo fa, ma i telescopi e gli spettografi dell'epoca non erano abbastanza sensibili per permettere agli osservatori di conoscere, di essi, molto più delle orbite. Durante la prima metà di questo secolo gli astronomi rivolsero la loro attenzione soprattutto a problemi non planetari, come l'origine dell'energia stellare, la struttura della Galassia e la natura dell'universo nel suo insieme. Perché interessarsi a piccoli freddi mondi a noi vicini?

Durante la seconda guerra mondiale la tecnologia della spettroscopia all'infrarosso progredì rapidamente, rendendo possibile lo studio di quella parte dello spettro elettromagnetico in cui compaiono le bande di assorbimento di molti gas freddi. Nella stessa regione si possono osservare sottili configurazioni spettrali dovute alle proprietà mineralogiche delle rocce di corpi extraterrestri. Tale sviluppo permise a Gerald P. Kuiper dell'Università di Chicago di scoprire nel 1944 la prima atmosfera non planetaria nel sistema solare, cioè il mantello di metano che avvolge il maggiore dei satelliti di Saturno: Titano. Tuttavia in seguito, per molti anni ancora, non si giunse a scoperte sensazionali. Progressi entusiasmanti si cominciarono ad avere solo quando, negli anni sessanta, soprattutto da parte della NASA (National Aeronautics and Space Administration), ci fu interesse e vennero assicurati i mezzi economici che permisero la messa a punto di molti strumenti perfezionati e di nuovi modi di utilizzarli.

I preparativi per il programma Apollo portarono a studi intensivi sulla Luna e sui problemi a essa legati. Laboratori geochimici sorti per analizzare campioni di rocce lunari fecero pratica sulle meteoriti, le sole rocce dello spazio interplanetario allora disponibili. Sia gli studi che precedettero sia quelli che seguirono gli allunaggi degli Apollo aumentarono l'interesse nei confronti di tutti i satelliti. Gli astronomi cominciarono a eseguire sofisticate osservazioni sulle proprietà spettrali dei satelliti planetari e intrapresero nuove ricerche sull'origine dei satelliti, degli asteroidi e delle comete.

Nel 1971, sonde interplanetarie inviarono a terra osservazioni ravvicinate dei due minuscoli satelliti di Marte. Immagini dei giganteschi satelliti di Giove furono ottenute nel 1973, da una distanza maggiore. Due sonde sono passate attraverso la fascia degli asteroidi e i veicoli spaziali con uomini a bordo hanno riportato campioni lunari da analizzare in laboratorio. Come ha notato Paul D. Lowman jr, un geologo della NASA, i campioni studiati più intensamente, nei due secoli di storia della scienza geologica non sono le rocce terrestri, ma quelle lunari.

Tutte queste ricerche hanno portato a due conclusioni inattese. In primo luogo i corpi minori del sistema solare costituiscono importanti punti di collegamento tra il presente e il passato. In secondo luogo, i dati forniscono un legame tra due discipline finora molto separate: la scienza planetaria e l'astrofisica. Discuteremo qui alcuni di questi legami. Partendo da una rassegna delle conoscenze che riguardano i corpi minori, considerati in ordine di distanza crescente dal

Il corpo tipo asteroide riprodotto nella fotografia della pagina a fronte è il maggiore dei satelliti di Marte, Phobos. Misura 20 per 23 per 28 chilometri ed è crivellato da crateri dovuti a numerose collisioni con corpi minori. Né Phobos, né il suo compagno Deimos, percorrono intorno a Marte orbite del tipo che ci si aspetterebbe per un asteroide catturato. È probabile che i due satelliti rappresentino i resti di un satellite maggiore frantumatosi per effetto di impatti del tipo di quelli che hanno deturpato il pianeta Marte. La fotografia è stata fatta da *Mariner 9* mentre era in orbita intorno a Marte.

Sole, tenterò di dare una visione sistematica dei dati, esaminando la distribuzione di massa tra tutti i corpi del sistema solare. Infine tenterò di spiegare come i corpi minori possono aver avuto un'origine e un'evoluzione nel tipo di nube da cui ha avuto origine il sistema solare.

I primi corpi che si incontrano allontanandosi dal Sole sono Mercurio e Venere. Nessuno dei due pianeti ha satelliti, ma c'è un valido motivo per parlarne ugualmente. I crateri sulla loro superficie significano che essi hanno avuto collisioni con corpi aventi fino a 100 chilometri di diametro, mentre, attualmente, solo alcune comete e qualche asteroide di piccole dimensioni, con orbite fortemente eccentriche, penetrano nella parte più interna del sistema solare. Questi occasionali visitatori sono i resti di un numero ben maggiore di planetesimali che popolavano il sistema solare interno molto tempo fa? La presenza di crateri indica che collisioni come queste furono un fattore importante nell'evoluzione del sistema solare?

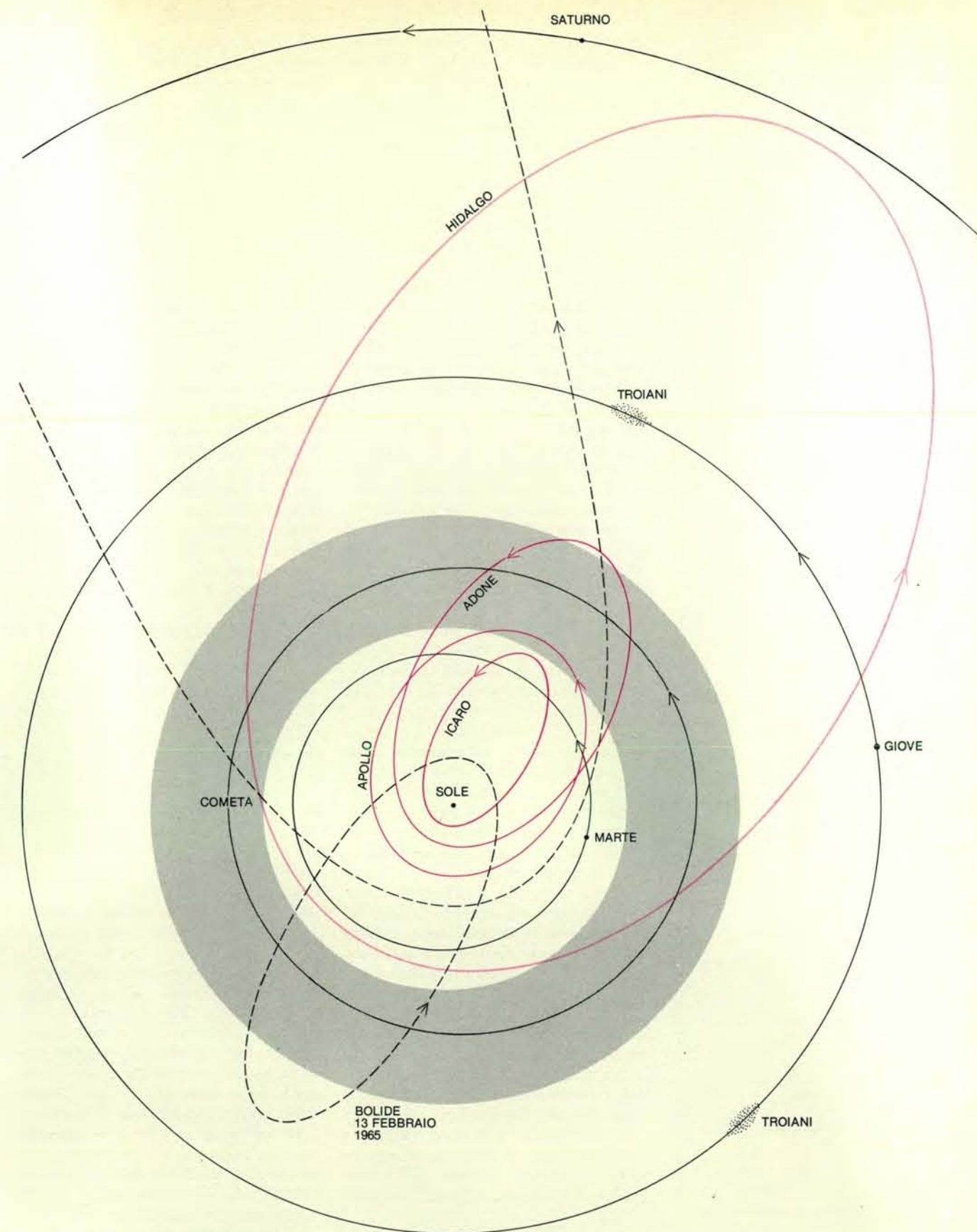
Studi recenti compiuti sulla Luna cominciano a fornire risposte affermative a queste domande. La scienza lunare è trattata a fondo in un'altra parte di questo fascicolo (si veda l'articolo *La Luna* di John A. Wood, a pagina 74), ma elenco ugualmente qui alcuni fatti chiave. La Luna è straordinariamente grande in confronto al suo pianeta. È formata di materiali che assomigliano in certo qual modo ai materiali degli strati superficiali della Terra, ma differiscono dai materiali del suo interno. Questa composizione non è mai stata completamente spiegata. D.R. Davis e io abbiamo recentemente proposto che l'impatto di un corpo enorme possa aver staccato dallo strato esterno della Terra molta parte dell'attuale massa lunare. Il riscaldamento iniziale della Luna ha prodotto una fusione parziale e la formazione della crosta primordiale. Nelle prime centinaia di milioni di anni della sua esistenza, questa crosta fu intensamente bombardata da planetesimali, alcuni con un diametro superiore a 100 chilometri e, di conseguenza, enormi crateri costellarono la superficie lunare. L'intenso bombardamento diminuì circa quattro miliardi di anni fa. In seguito, alcune parti della crosta primordiale fusero per successivo riscaldamento e altre parti furono inondate da getti di lava. Da allora la Luna è stata ulteriormente bombardata, ma il bombardamento, sebbene relativamente costante, è stato meno intenso.

Piccoli corpi continuano a bombardare i pianeti interni. Per esempio, un gruppo a vita breve continua ad attraversare l'orbita terrestre, lasciando aperta la possibilità che l'uno o l'altro di questi corpi possa un giorno formare un cratere sulla Terra o sulla Luna. Si tratta dei pianetini Apollo, un gruppo che ha preso il nome da uno dei suoi membri. James Williams, Brian G. Marsden, Eugene M. Shoemaker e Fred L. Whipple stanno tutti studiando e classificando gli asteroidi di questo gruppo. Una catalogazione recente comprende 19 asteroidi Apollo con un diametro compreso tra circa 200 metri e sei chilometri, ma gli osservatori ritengono che ve ne siano ancora molti da scoprire. Il pericolo per i pianeti interni non è limitato agli Apollo. Vi è una grande quantità di altri asteroidi e una ancora maggiore di comete che potrebbero venire deviate su orbite che intersechino l'orbita terrestre.

Gli asteroidi Apollo sono stati studiati sotto molti aspetti diversi. Due di essi, Eros e Icaro, sono stati esplorati dal radar. Nel gennaio del 1975 l'ex astronauta Brian O'Leary ha diretto un nuovo progetto riguardante i pianetini Apollo. Nella notte del 23 gennaio, in base a calcoli terminati solo due ore prima dell'evento, Eros avrebbe dovuto eclissare una stella di terza grandezza nella costellazioni dei Gemelli e l'ombra dell'asteroide avrebbe dovuto proiettarsi sul Connecticut, nelle vicinanze di New Britain. Essendo già a conoscenza del percorso dell'ombra, gruppi di osservatori si recarono sul luogo e cronometrarono l'occultazione di tre secondi della stella. Otto osservazioni positive e altre negative, permisero di ricalcolare le dimensioni e la forma di Eros: si tratta di una lastra che misura circa sette per 19 per 30 chilometri.

Gli asteroidi Apollo hanno dimostrato di essere imparentati con un gruppo molto più familiare di oggetti minori che intersecano l'orbita terrestre: le meteoriti. L'analogia delle orbite di entrambi i gruppi è stata notata da qualche tempo, mentre nei confronti eseguiti a proposito delle caratteristiche spettrali è emersa una seconda analogia. Clark R. Chapman, Thomas B. McCord e i loro collaboratori hanno recentemente intrapreso lo studio di molti asteroidi diversi e hanno confrontato i loro risultati con gli spettri di laboratorio relativi a cinque diverse classi di meteoriti. Hanno trovato molte caratteristiche simili: la rassomiglianza più stretta era tra loro, un asteroide Apollo, e la classe di meteoriti nota come condriti di tipo *L*. Forse alcune delle condriti *L* conservate nei musei di tutto il mondo sono frammenti staccatisi da Toro. Può darsi, inoltre, che con il progredire di questi studi sia possibile identificare in altri asteroidi singoli la fonte di tipi specifici di meteoriti.

Per quanto riguarda le meteoriti, esse esistono in abbondanza, ma è possibile rilevarle solo quando sfiorano l'atmosfera terrestre dove bruciano completamente o sopravvivono e raggiungono il suolo. Meteoriti delle dimensioni di un pugno sono così comuni che molte colpiscono la Terra ogni anno. Attualmente i dati sulle meteoriti sono di quando in quando raccolti dai sistemi di monitoraggio dell'Air Force, progettati per rilevare i missili a lungo raggio in volo, ma la maggior parte di queste informazioni è tenuta segreta. Tuttavia un avvenimento largamente osservato nel 1972 può costituire un esempio. Il 10 aprile di quell'anno sia i satelliti dell'Air Force sia le persone a terra osservarono il passaggio di una meteorite a un'altezza di 60 chilometri sullo stato del Montana. La meteorite, che, secondo una valutazione approssimativa doveva pesare circa 1000 tonnellate, rimbalzò fuori dell'atmosfera terrestre nello spazio. Se questo corpo fosse stato solo di pochi chilometri più basso, si sarebbe potuto abbattere sulla provincia canadese di Alberta, producendo una tremenda esplosione e un cratere di circa 100 metri di diametro. Non si sa quanto frequenti siano questi scontri evitati di pochissimo e neppure quanti siano gli urti diretti. Alcuni esperti di statistica hanno supposto che la frequenza sia di circa una collisione per secolo con un corpo notevolmente più grande della meteorite del Montana. (Ci può confortare il pensiero che tre su quattro di queste grandi meteoriti cadrebbero negli oceani e non sulla terraferma.) Una di queste collisioni, probabilmente con una cometa, ebbe luogo in Siberia nel 1908 e fu osservata da pochi testimoni sbalorditi. Se lo stesso corpo avesse colpito New York, l'area bruciata sarebbe arrivata fino oltre Jersey City, e il «colpo assordante» riferito dai testimoni siberiani sarebbe stato udito da Washington a Boston. Le meteoriti e gli asteroidi Apollo non sono oggetto di interesse puramente accademico.

Continuando ad allontanarsi dal Sole, si incontra Marte accompagnato da due satelliti peculiari che non sono più grandi di asteroidi di modeste proporzioni. Le bellissime fotografie fatte da *Mariner 9* forniscono una prova ulteriore di collisioni interplanetarie. Entrambi i satelliti di forma irregolare sono fittamente crivellati da crateri. Le dimensioni di Phobos sono 20 per 23 per 28 chilometri; quelle di Deimos solo 10 per 12 per 16 chilometri. Le loro orbite circolari intorno a Marte non sono del tipo che ci si aspetterebbe se essi fossero veri asteroidi, catturati gravitazionalmente dal pianeta dalla vicina fascia principale dei pianetini. Alcuni miei colleghi e io abbiamo perciò proposto che essi possano essere i resti frantumati e forse parzialmente ricostituiti di un iniziale singolo

I pianetini (o asteroidi) ruotano intorno al Sole su orbite di forme assai diverse. Alcune orbite tipiche sono qui riportate come appaiono da una posizione sopra il piano del sistema solare. La maggior parte dei pianetini si trovano in una fascia (*in grigio*) tra Marte e Giove; le variazioni nella loro concentrazione sono illustrate nella pagina successiva. Gli Apollo, 19 piccoli asteroidi che prendono il nome da uno di essi, seguono strane orbite che portano alcuni di essi entro l'orbita di Mercurio; tre di queste orbite appaiono nello schema (*in colore*). Una famiglia di circa 1000 asteroidi, noti come Troiani, si trova sull'orbita di Giove (*in nero*). Nel punto lagrangiano che precede Giove di 60 gradi vi è circa un numero di pianetini doppio rispetto a quelli che si trovano nel punto lagrangiano che segue Giove di 60 gradi. Il più eccentrico di tutti i pianetini è Hidalgo (*in colore chiaro*); nel suo punto più lontano dal Sole Hidalgo si avvicina all'orbita di Saturno. Sono pure illustrate le orbite di due corpi piccoli (*linee tratteggiate*): una cometa e un bolide che sfiorarono l'atmosfera terrestre nell'anno 1965.

La fascia degli asteroidi (*a sinistra*), una regione che comincia a circa 2,2 unità astronomiche dal Sole, mostra un'irregolarità nella distribuzione dei corpi. Le sette depressioni maggiori nel grafico tra 2,2 e 3,3 unità astronomiche, note come *gap* di Kirkwood, sono spazi in cui sono presenti pochi asteroidi a causa delle perturbazioni dovute al campo gravitazionale di Giove.

grande satellite del pianeta Marte.

La fascia principale degli asteroidi, una raccolta di migliaia di corpi rocciosi, si trova tra Marte e Giove. La maggior parte degli asteroidi è più vicina a Marte che a Giove, in accordo con la legge di Bode sulle distanze planetarie. Si tratta probabilmente di corpi che non si sono mai uniti a costituire un pianeta. Il pianetino più grande è Cerere con 955 chilometri di diametro. Si è calcolato che la massa totale di tutti gli altri asteroidi della fascia principale dovrebbe avvicinarsi alla massa di Cerere.

Recenti studi spettrografici dimostrano che si possono dividere gli asteroidi in due classi distinte (si veda l'articolo *La natura degli asteroidi* di Clark R. Chapman in «Le scienze» n. 81, maggio 1975). Finora sono stati esaminati spettrofotometricamente circa 200 grandi asteroidi e si è visto che circa il 10 per cento ha spettri analoghi a quelli delle meteoriti classificate come litoidi-ferrose. Gli asteroidi di questa classe hanno generalmente da 100 a 200 chilometri di diametro e sono concentrati nella parte della fascia degli asteroidi più vicina a Marte. Lo spettro di circa l'80 per cento di essi ha una maggiore somiglianza con gli spettri delle meteoriti più antiche che si conoscano: le condriti carbonacee. Sembra ora definitivamente accertato che le condriti carbonacee contengono minerali tipici dei materiali che si formarono quando cominciò a raffreddarsi la nebulosa che diede origine al Sole. Si tratta delle meteoriti che hanno subito il riscaldamento minimo e sono andate incontro al minor numero di metamorfosi e contengono ancora acqua in abbondanza in varie combinazioni chimiche.

Come si devono interpretare queste rassomiglianze tra asteroidi e meteoriti? Gli asteroidi che assomigliano a condriti carbonacee potrebbero essere quelli che non furono mai frammentati da collisioni o non furono mai tanto grandi da diventare molto caldi all'interno. Hanno perciò conservato la loro superficie minerale primordiale. Gli asteroidi che assomigliano a meteoriti litoidi-ferrose possono essere resti di nuclei metallici che si sono formati entro corpi più grandi quando il calore e la fusione produssero la separazione dei materiali leggeri da quelli pesanti. È opinione diffusa che quello che vediamo ora sia il prodotto finale di collisioni catastrofiche che fecero saltare via dal mantello esterno dei corpi più grandi i silicati leggeri. Può darsi che Cerere, con un diametro circa doppio del secondo pianetino in ordine di grandezza, Pallade, sia un planetesimale in uno stadio evolutivo più avanzato, che ha cominciato ad avvicinarsi alle dimensioni planetarie proprio quando i principali processi di formazione del sistema solare stavano finendo.

Vi sono ancora altri asteroidi oltre la fascia principale, vincolati in posizione stabile lungo l'orbita di Giove e che precedono e seguono rispettivamente di 60 gradi il pianeta gigante. I due ammassi sono noti come pianetini Troiani e circa 1000 di essi sono noti. Occupano i due punti del sistema Giove-Sole in cui Joseph Louis Lagrange dimostrò che si possono accumulare corpi piccoli. (Fu solo nel 1905, circa un secolo dopo la morte di Lagrange, che fu scoperto Achille, il primo dei pianetini troiani). Le analisi spettrali dimostrano che, come gruppo, i Troiani sono i più oscuri di tutti gli asteroidi. Possono essere composti dai detriti rimasti dopo la formazione di Giove, o anche essere accrezioni di materiale interplanetario attratto gravitazionalmente verso il pianeta gigante. Studi recenti di Tom Gehrels dell'Università dell'Arizona hanno messo in evidenza che, per qualche motivo sconosciuto, vi sono almeno il doppio di Troiani nel punto lagrangiano che precede Giove rispetto al punto che lo segue.

Giove stesso ha più satelliti di qualsiasi altro pianeta del sistema solare. Il totale è ora 13, dopo l'ultima scoperta fatta nel 1974 da Charles T. Kowal del California Institute of Technology. I satelliti di Giove si dividono in tre gruppi: il gruppo interno ne annovera cinque. Il più vicino al pianeta è un piccolo satellite, Amaltea. Poi vengono i quattro grandi satelliti scoperti da Galileo: Io, Europa, Ganimede e Callisto, in ordine di distanza crescente. Amaltea è molto piccolo, forse 150 chilometri di diametro, e se ne sa ben poco. Le orbite di tutti e cinque i satelliti interni sono circolari e giacciono sul piano equatoriale di Giove.

Io, un corpo di discrete dimensioni, con un diametro di 3640 chilometri, presenta alcuni dei più bizzarri fenomeni del sistema solare. A cavallo del secolo, un intelligente osservatore, Edward Emerson Barnard dello Yerkes Observatory, notò il primo fenomeno: i poli di Io hanno calotte rossastre. Ora la scoperta di Barnard è stata documentata con fotografie a colori fatte da R.B. Minton dell'Università dell'Arizona. Ulteriori particolarità sono state riferite negli anni sessanta da A.B. Binder e da Dale P. Cruikshank che erano allora all'Università dell'Arizona. Essi trovarono che Io, che spesso penetra nell'enorme ombra di Giove, è più luminoso del solito di almeno una piccola percentuale per 15 minuti circa dopo che ne emerge. Binder e Cruikshank hanno suggerito che Io possa avere un'atmosfera e che durante la fredda e buia eclissi, nubi o brina possano condensare, per dissiparsi quando il satellite emerge nella luce solare.

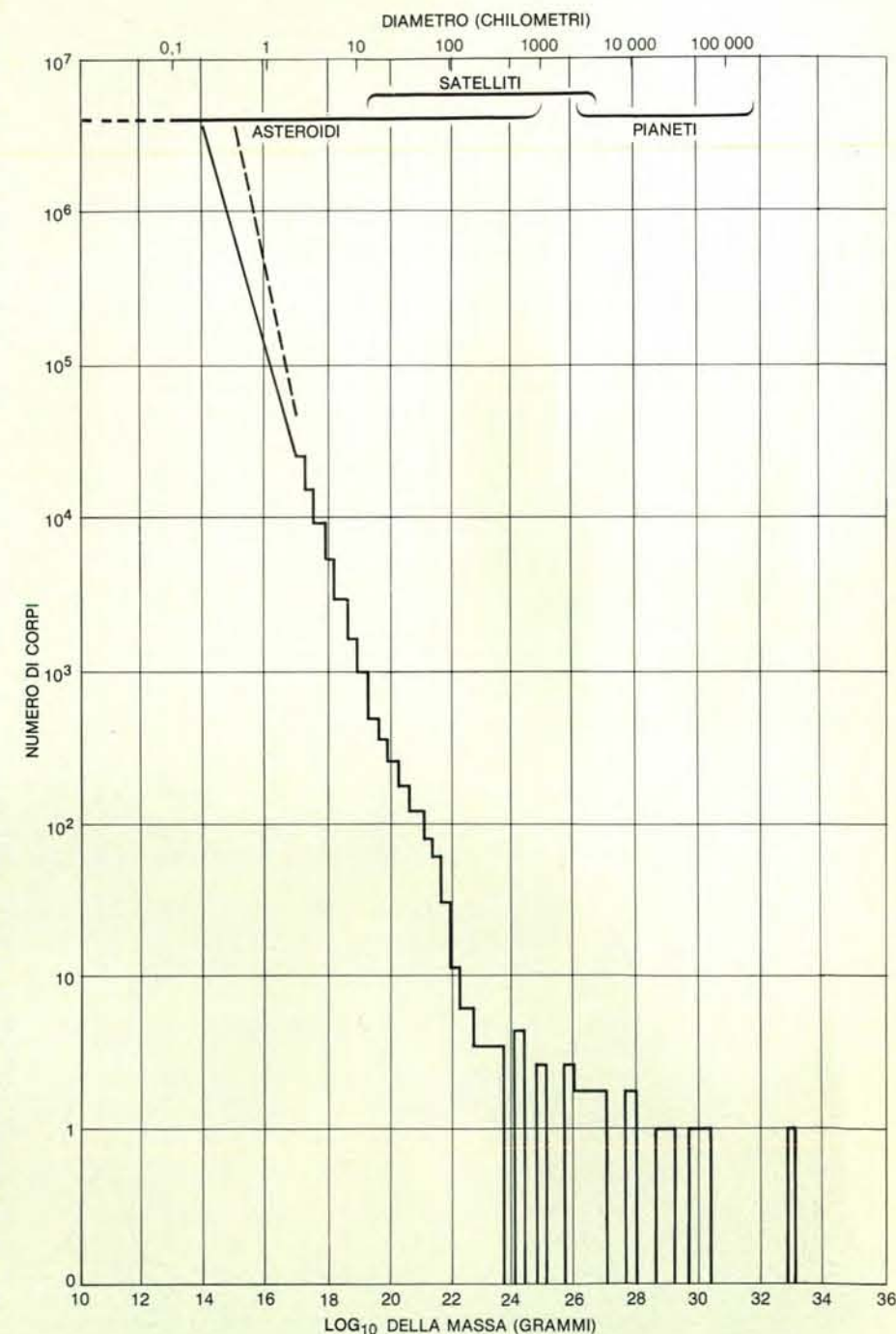
Da allora si sono osservate moltissime altre eclissi di Io e si è trovato che la maggiore luminosità ha luogo solo per metà del tempo. Perché ciò avvenga resta un mistero. Una prova recente fa tuttavia supporre che il fenomeno possa essere dovuto non a nubi o a brina, ma all'alterazione di materiali colorati sulla superficie di Io, forse composti dello zolfo, dovuta alle basse temperature che si hanno durante l'eclissi.

Un altro fenomeno strano circa Io è stato notato negli anni sessanta dal radioastronomo E.K. Bigg, che osservò una stretta correlazione tra la posizione di Io sull'orbita e gli scoppi di rumore radio provenienti da Giove. Evidentemente il rumore radio si genera quando Io disturba il campo magnetico di Giove.

Nel 1973, durante l'avvicinamento della sonda spaziale *Pioneer 10* a Giove, Arvydas J. Kliore e i suoi colleghi del Jet Propulsion Laboratory del California Institute of Technology stabilirono l'esistenza di uno strato di particelle ionizzate a circa 100 chilometri sopra la superficie di Io. Questo significa che il satellite ha una atmosfera, per quanto estremamente rarefatta. Si stima che la pressione alla superficie sia inferiore a un miliardesimo della pressione atmosferica sulla superficie della Terra. Nel 1974 Robert Brown della Harvard University aumentò la lista delle stranezze scoprendo che Io era circondato da un chiarore giallastro: l'emissione della riga *D* caratteristica del sodio. Il chiarore si estende verso l'esterno di Io per parecchi diametri ed è dovuto alla diffusione della luce del Sole da parte degli atomi di sodio sulla superficie del satellite.

La scoperta di Brown rappresenta un felice incontro tra teoria e osservazione. Tempo fa Fraser P. Fanale, un esperto di chimica planetaria del Jet Propulsion Laboratory ipotizzò che Io fosse coperto da sali evaporitici ricchi di sodio. Se Io è stato riscaldato e la sua acqua eliminata - pensava Fanale - i sali prima sciolti nall'acqua sarebbero rimasti sulla superficie. Quando si sommano tutte queste osservazioni, il modello che meglio si presta a spiegare le proprietà peculiari di Io è quello di un mondo bruno rossastro, coperto di cristalli evaporitici (forse cristalli di cloruro di sodio) con depositi di zolfo di colore rossastro più scuro ai poli e circondato da un cielo spesso illuminato da una gialla aurora.

Gli altri tre satelliti galileiani di Giove hanno superfici coperte in varia misura, non tanto da sale e zolfo quanto da ghiaia e ghiacci. Europa coi suoi 3100 chilometri di diametro è più piccolo di Io. Ganimede, con un diametro di 5270 chilometri, è uno dei maggiori satelliti del sistema solare e Callisto con 5000 chilometri di diametro è solo di poco più piccolo. Callisto è anche più scuro degli altri forse perché c'è più materiale roccioso esposto. Le differenze chimiche tra i quattro satelliti continuano a essere oggetto di ricerche.

Allontanandosi da Giove, si incontra un gruppo di quattro satelliti che vanno da 18 a 60 chilometri di diametro. Si muovono su orbite inclinate di un angolo di circa 28 gradi sul piano equatoriale del pianeta e a circa 11,6 milioni di chi-

La distribuzione di massa tra i corpi del sistema solare è raffigurata in questo grafico logaritmico. Verso il limite delle piccole masse (*a sinistra*) vi è un'incertezza riguardo al numero di corpi nel sistema; la linea tratteggiata corrisponde all'inclusione delle comete. Le parti della curva al centro e a destra sono basate su conteggi effettivi. È chiaro che una parte sproporzionata della massa totale è posseduta dai pianeti e dai loro satelliti che crebbero incorporando la maggior parte dei piccoli planetesimali iniziali.

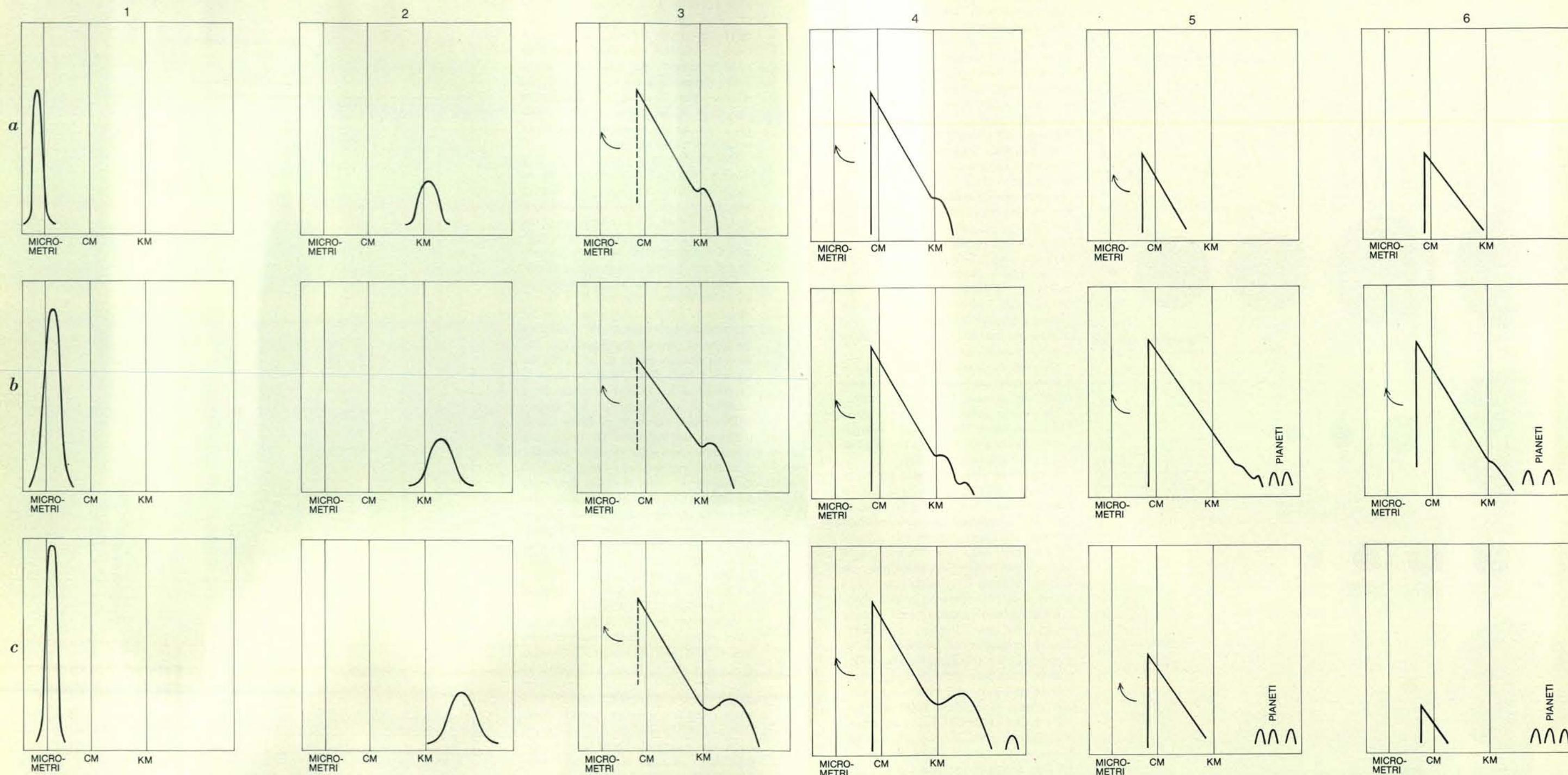
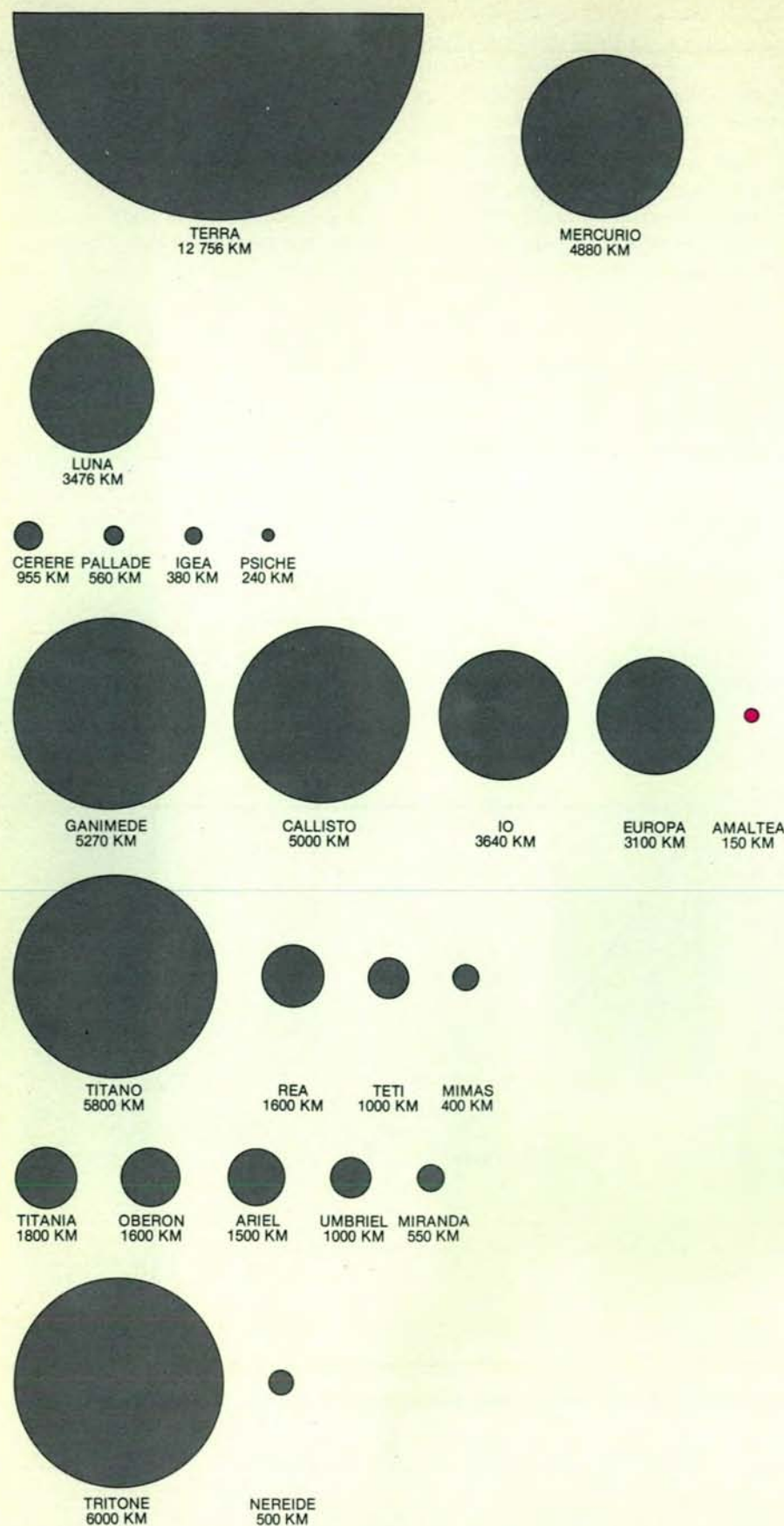
lometri da esso. Uno dei quattro è il satellite n. 13, scoperto da Kowal nel 1974 e a cui, successivamente, è stato dato il nome di Leda.

Anche il gruppo più esterno dei satelliti di Giove ne conta quattro. Sono tutti piccoli: hanno diametri compresi tra 16 e 22 chilometri. Questi quattro sono a circa 22 milioni di chilometri da Giove e sono notevoli perché, a differenza degli altri nove satelliti, si muovono intorno a Giove in direzione retrograda. Le loro orbite sono inclinate di circa 25 gradi rispetto al piano equatoriale del pianeta.

I due gruppi presentano molti interrogativi. Tanto l'agglomerarsi di orbite in ciascun gruppo, quanto l'alta inclinazione di tali orbite e la rivoluzione retrograda del gruppo esterno indicano che questi satelliti sono dissimili dal sistema solare in miniatura formato da Giove e dai cinque satelliti interni. Forse i due gruppi esterni sono planetesimali catturati da speciali processi che favorirono l'unione di ciascuno dei nuovi prigionieri o a un gruppo o all'altro. O forse, come suggerisce la scienziata russa Z.A. Aitekeeva, i due gruppi sono i frammenti ammassati di due satelliti più grandi che furono frantumati da collisioni con comete o con i pianetini Troiani erranti.

Saturno, il secondo pianeta in ordine di grandezza, è anche il secondo per numero di satelliti, complessivamente 10. Il decimo è stato scoperto nel 1966 dall'astronomo francese Audouin Dollfus e si tratta di Giano, il più interno dei satelliti di Saturno, con un diametro di circa 200 chilometri. Allontanandoci dal pianeta troviamo cinque satelliti piuttosto piccolini prima di raggiungere l'orbita del grande Titano. Essi hanno diametri compresi tra 400 e 1600 chilometri, sono probabilmente corpi ghiacciati, si valuta che le loro densità stiano tra uno e 1,5 grammi per centimetro cubo.

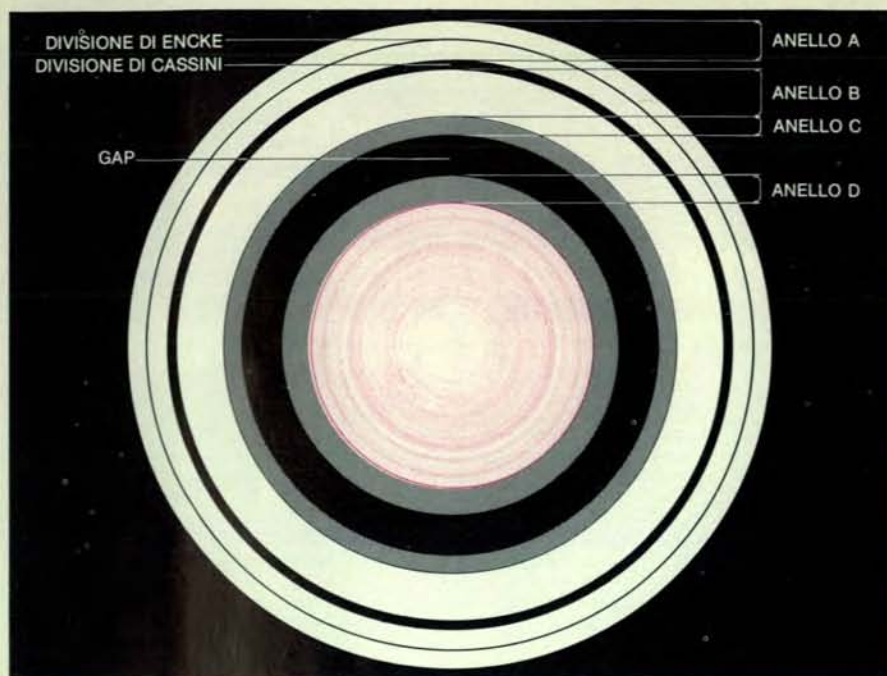
Negli anni successivi alla scoperta da parte di Kuiper dell'atmosfera di Titano si è avuta una successione di sorprese. Il satellite è stato a lungo oggetto di attenzione per le sue dimensioni. All'inizio del 1975, però, Joseph F. Veverka e i suoi collaboratori della Cornell University hanno calcolato di nuovo il diametro di Titano e lo hanno valutato in circa 5800 chilometri. Ciò lo pone tra i tre maggiori satelliti del sistema solare, forse il più grande.

Il gruppo di Veverka e altri scienziati hanno trovato che ciò che si osserva al

L'evoluzione di piccoli corpi dalla condensazione nebulare in tre sistemi stellari è tracciata in una sequenza di diagrammi che riportano la distribuzione delle dimensioni. All'inizio (*1*) i grani di polvere che si sono formati nei tre sistemi sono tutti delle dimensioni del micrometro. L'abbondanza di grani è però differente: il sistema *A* contiene il minimo di polvere, il sistema *C* il massimo e il sistema *B* quello intermedio. L'accumulazione gravitazionale (*2*) produce planetesimali multichilometrici in tutti e tre i sistemi; questi tendono a essere più grandi nel sistema *B* e nel sistema *C* che non nel sistema *A*. Quando i planetesimali si sono formati comincia la competizione (*3*) tra accrezione e collisione distruttiva; tutti e tre i sistemi cominciano a perdere tutti i frammenti di collisioni inferiori a un centimetro di diametro. Nel frattempo le collisioni a bassa velocità che aumentano massa e attrazione gravitazionale portano allo sviluppo di corpi più grandi (*4*) nel sistema *B* e nel sistema *C*. Nel sistema *A*, invece, nessun planetesimale è abbastanza grande da continuare a crescere; la collisione, infatti, supera l'accrezione. Al momento opportuno (*5*), sebbene l'accrezione abbia prodotto corpi di dimensioni planetarie nel sistema *B* e nel sistema *C*, i planetesimali nel sistema *A* sono tutti inferiori a un chilometro. Nel sistema *C* tutti i corpi di dimensioni chilometriche e quasi tutti i resti più piccoli delle collisioni sono stati raccolti dai pianeti in via di accrescimento (*6*). Poiché i pianeti non crebbero in ogni parte del sistema *B*, molti planetesimali dell'ordine del chilometro non furono conglobati. La popolazione di piccoli corpi del sistema *B* è simile agli asteroidi e agli altri frammenti più piccoli del sistema solare.

Alcuni corpi minori tipici sono messi a confronto con la Terra, che è mostrata solo in parte (*in alto a sinistra*) e con Mercurio (*in alto a destra*). Nell'ipotesi che siano stimati in modo corretto i diametri di Tritone, un satellite di Nettuno, e di Titano, un satellite di Saturno, vi sono quattro satelliti maggiori di Mercurio. Cerere, il pianetino più grande, è maggiore di molti dei satelliti più piccoli. Per esempio si pensa che Amaltea (*in colore*), il più interno dei 13 satelliti di Giove, abbia un diametro di 150 km. Non sono raffigurati 16 satelliti: otto di Giove, sei di Saturno e due di Marte.

telescopio non è la superficie scoperta di Titano, ma una coltre di nubi bruno-rossastre che nascondono il suolo, a volte parzialmente, a volte totalmente. Si è anche visto che l'atmosfera di Titano è molto più densa di quanto si pensava ed è formata soprattutto da metano e da idrogeno in proporzioni circa uguali.

Studi condotti da James B. Pollack dell'Ames Research Center della NASA indicano che la pressione atmosferica sulla superficie di Titano è tra 0,1 e una atmosfera terrestre. Le condizioni superficiali su Titano sono però diverse da quelle terrestri. Infatti la superficie stessa potrebbe essere ghiaccio e la temperatura è di circa 125 kelvin (circa 148 gradi centigradi sotto zero). È però possibile che Titano non sia tanto diverso dalla Terra quanto può sembrare. La maggior parte dei geochimici ritengono che l'atmosfera originaria della Terra fosse ricca di metano e idrogeno. Se su Titano vi fosse un'attività geotermica o vulcanica non vi potrebbero esistere specchi temporanei d'acqua calda? In queste circostanze sarebbe possibile la formazione di molecole organiche complesse; condizioni analoghe a queste sono esattamente quelle che si hanno nella sintesi degli amminoacidi in laboratorio. Il lontano Titano è dunque interessante dal punto di vista biochimico, anche se la presenza su di esso della vita è improbabile.

Due dei tre satelliti di Saturno che si trovano fuori dell'orbita di Titano sono diversi dal comune. Febo, il più esterno, è un piccolo satellite che misura forse 250 chilometri di diametro. La sua orbita, retrograda e inclinata, richiama quella dei satelliti esterni di Giove.

Il vicino di Febo, Giapeto, ha un aspetto ancora più straordinario: uno dei suoi emisferi è sei volte più brillante dell'altro. L'emisfero anteriore nel senso del moto di Giapeto riflette solo il quattro per cento della luce solare e questa bassa riflettività significa che è più nero di una lavagna. L'emisfero posteriore nel senso del moto però ha un'alta riflettività e ha uno splendore pari circa a quello della neve. Si possono proporre diverse spiegazioni. È possibile che un grande impatto abbia scagliato fuori fine polvere brillante e che essa si sia posata solo su una parte del satellite? Oppure uno sciame di meteoriti colpì solo una parte di Giapeto lasciando altrove intatta una superficie di ghiacci? Un'ipotesi abbastanza convincente fu formulata nel 1974 da Steven Soter della Cornell University. Egli fece notare che l'effetto Poynting-Robertson (un moto risultante verso l'interno di piccole particelle orbitanti esposte a radiazioni) avrebbe fatto sì che tutta la fine polvere erosa da Febo si muovesse con moto a spirale verso l'interno in direzione di Saturno. Come

Gli anelli di Saturno, mostrati schematicamente in una proiezione dall'alto, sono fatti di alcuni dei più enigmatici corpi minori del sistema solare. Di dimensioni centimetriche, essi sono o pezzetti di ghiaccio o particelle ricoperte di ghiaccio. Alcuni ritengono che siano minuscoli planetesimali che condensarono dove sono attualmente all'epoca in cui avvenne la formazione del sistema solare. Altri invece pensano che siano detriti formati da collisioni o da frammentazione mareale di planetesimali maggiori.

lo stesso Febo, le particelle di polvere si muoverebbero in direzione opposta al moto di Giapeto, di modo che quelle che intersecano l'orbita di Giapeto colpirebbero ad alta velocità l'emisfero anteriore. Soter suggerisce che questa eccezionale circostanza possa essere la fonte dell'asimmetria visiva di Giapeto: forse la pioggia di particelle causa un'erosione anomalà o un accumulo di polvere o entrambi.

Saturno è noto naturalmente, non tanto per le curiose proprietà dei suoi satelliti, quanto per i suoi spettacolari anelli. Un telescopio da dilettanti permette di vedere gli anelli come un disco solido intorno al pianeta, ma fin dal 1859 James Clerk Maxwell dimostrò teoricamente che il disco non può essere solido e nel 1895 un astronomo americano, James Keeler, confermò la previsione di Maxwell per mezzo di osservazioni spettroscopiche. Gli anelli sono composti di innumerevoli migliaia di particelle satelliti. Un recente esame fatto da Pollack delle osservazioni relative agli anelli suggerisce che le particelle abbiano un diametro tipico di alcuni centimetri.

Gli anelli sono divisi da intervalli (*gap*) che furono probabilmente creati da interazioni dinamiche coi vicini satelliti di Saturno. Gli anelli hanno una larghezza totale di circa 270 000 chilometri, ma uno spessore di soli pochi chilometri. Un veicolo spaziale che attraversasse il piano del sistema degli anelli con un piccolo angolo, incontrerebbe particelle degli anelli per non più di pochi centesimi di secondo.

I teorici stanno ancora cercando di spiegare l'origine degli anelli di Saturno. Studi spettroscopici fatti da Carl Pilcher e da altri hanno dimostrato che le particelle degli anelli sono composte o ricoperte di ghiaccio d'acqua. Le particelle avrebbero potuto condensarsi durante la formazione del sistema solare o potrebbero essere i frammenti di satelliti polverizzati. Alcuni modelli esplicativi propongono che le particelle fini raramente oggi collidano. Altri modelli suggeriscono che gli anelli stiano ancora evolvendo come risultato di continue collisioni e che non si debbano necessariamente far risalire all'origine del sistema solare. Da entrambi i punti di vista, gli anelli di Saturno sono un laboratorio naturale per lo studio di sciami di piccoli corpi nello spazio.

Considerate le stranezze viste finora, che cosa ci si deve aspettare dai satelliti di Urano e di Nettuno? Su di essi si sa poco a causa della grande distanza. Urano ha cinque satelliti, Nettuno ne ha due, uno dei quali è probabilmente il più grande del sistema solare. I cinque satelliti di Urano ruotano intorno al pianeta sul piano del suo equatore. L'orientazione è abbastanza normale, senonché Urano stesso è inclinato di un angolo di circa 90 gradi sul piano della sua orbita intorno al Sole. Evidentemente la forza che inclinò Urano, qualunque essa fosse, o spostò i satelliti insieme al pianeta o agì sul pianeta prima che esso acquistasse satelliti. Un gruppo di astronomi russi e S. Fred Singer dell'Università della Virginia hanno proposto indipendentemente che sia stata una collisione con un planetesimale di dimensioni planetarie a far inclinare Urano e può darsi che l'impatto abbia provocato la formazione dei cinque satelliti.

Il satellite interno di Nettuno, Tritone, con un diametro che si valuta di 6000 chilometri, è un altro satellite che si muove su un'orbita retrograda. Questo fatto può servire a risolvere un problema ancora insoluto. Plutone, con un diametro che si stima di 5800 chilometri, è considerato di solito come il nono pianeta del sistema solare anche se la sua orbita, straordinariamente eccentrica, lo porta a volte ad avvicinarsi al Sole più di quanto faccia Nettuno. Alcuni teorici, soprattutto Kuiper e R.A. Lyttleton dell'Università di Cambridge, hanno suggerito che Plutone fosse una volta un satellite di Nettuno. I modelli di cui si servono per spiegare il fenomeno mostrano un'interazione tra Tritone e Plutone sufficientemente intensa sia per portare Tritone sulla sua orbita retrograda sia per espellere Plutone dalla sfera di influenza di Nettuno.

Sebbene l'orbita di Plutone sia a circa 40 unità astronomiche dal Sole (40 volte la distanza tra il Sole e la Terra), il censimento dei corpi minori del sistema solare è ancora lontano dall'essere completo. Viaggiando verso i confini esterni del sistema, qualche migliaio di unità astronomiche oltre Plutone, vi sono miliardi di corpi ghiacciati con diametri che si valutano da 100 chilometri a poche decine di metri: si tratta delle comete. Le loro inclinazioni orbitali sono praticamente casuali. A volte una di esse è perturbata da forze stellari o planetarie e penetra nel sistema solare interno. Quando una cometa penetra all'interno dell'orbita di Giove, la radiazione solare converte parte del suo materiale ghiacciato in gas che ne forma l'alone e la coda caratteristici.

Alcune comete passano così vicino al Sole, da perdere catastroficamente massa e rompersi in frammenti. Altre possono compiere diversi passaggi, perdendo un po' di materiale a ciascun avvicinamento finché «muoiono», diventando probabilmente un residuo di materiale pietroso che non può più trasformarsi in gas. Altre comete ancora possono avvicinarsi abbastanza a uno dei pianeti da subire un'ulteriore perturbazione dell'orbita finché finiscono per comportarsi come i pianetini Apollo. In realtà alcuni studiosi ritengono che alcuni pianetini

Apollo siano comete estinte. La maggior parte delle comete però rimane in una zona molto al di là dei pianeti esterni.

Come si può riuscire a fornire un quadro sistematico dei diversi corpi minori del sistema solare? Alcuni sono grandi, altri piccoli, alcuni ghiacciati, alcuni rocciosi, alcuni nudi, altri avvolti da un'atmosfera. Una generalizzazione possibile è che la formazione di sistemi associati di piccoli corpi sia un sottoprodotto comune della formazione dei grandi corpi del sistema solare. Il sistema solare stesso contiene un corpo grande, il Sole, e molti satelliti: i pianeti interni terrestri, i pianeti esterni gioviani e lo sciame irregolare di comete. Tre dei pianeti giganti sono essi stessi sistemi solari in miniatura. Giove, Saturno e Urano hanno infatti un'analoga configurazione: piccoli satelliti interni, grandi satelliti intermedi e satelliti esterni irregolari.

Un ulteriore accordo si sta sviluppando riguardo alle molteplici e interessanti differenze di composizione che sono evidenti tra i pianeti e i satelliti del sistema solare. Anche se altri fattori hanno la loro importanza, la maggior parte delle differenze tra i pianeti si possono oggi spiegare in termini di differenza di temperatura a distanze maggiori o minori dal Sole e di differenze nei campi gravitazionali che sono una funzione delle diverse masse dei nove corpi. Manca però ancora una teoria particolareggiata sulle differenze di composizione e di densità tra satelliti e asteroidi.

Un metodo fondamentale per affrontare la questione è quello di considerare la distribuzione di massa tra i componenti del sistema solare. Al limite delle grandi masse la distribuzione è statisticamente irregolare: i corpi grandi sono sovrabbondanti. La distribuzione diventa più regolare però al crescere del numero dei corpi, la loro massa diminuisce e i loro diametri cadono nell'ordine delle decine di chilometri. Infatti il numero di corpi piccoli, *N*, risulta essere legato alla massa, *m*, da una legge di potenza: *N* è proporzionale (approssimativamente) a *m* elevato alla potenza —2/3.

Questa relazione di proporzionalità del numero alla massa è però quella caratteristica di solidi spezzati in seguito a collisioni. Circa 15 anni fa, Gerald S. Hawkins dell'Università di Boston, stabilì la relazione per quanto riguarda le meteoriti e propose che la frammentazione degli asteroidi dovuta a collisioni fosse il meccanismo responsabile di essa. Una decina di anni fa Shoemaker trovò che i detriti espulsi dai crateri lunari mostravano una relazione simile sebbene l'esponente nella legge di potenza fosse più vicino a —1 che a —2/3. Ho riguardato la bibliografia geologica e ho anche fatto esperienze allo scopo di valutare tale relazione trovando che essa esiste in natura in una larga fascia di processi di collisione e di frantumazione. Al crescere dell'energia di esplosione (o della pressione di frantumazione), l'esponente cambia da circa —2/3 a —1 o —1,2. La conclusione è che, almeno per quello che riguarda i corpi di dimensioni paragonabili a quelle attuali dei pianetini, la distribuzione di massa dei piccoli corpi è una testimonianza di collisioni.

I crateri che segnano la superficie della Luna, di Mercurio, di Marte, di Venere (rivelati dai dati trasmessi dalle sonde radar e dalle fotografie ottenute da *Venera 9* e *Venera 10* il 22 e 25 ottobre 1975) e della Terra (rivelati dalla fotografia aerea e orbitale) sono naturalmente una prova diretta delle innumerevoli collisioni caratteristiche del sistema solare. Questi bersagli sono stati colpiti ripetutamente da corpi di dimensioni variabili da meno di un millimetro a più di 100 chilometri. L'età delle rocce lunari e terrestri mostra che il bombardamento è durato miliardi di anni. Quando si contano e si misurano i crateri, ricostruendo in questo modo una registrazione del numero e della massa dei planetesimali responsabili, la relazione di proporzionalità tra i due obbedisce alla stessa legge di potenza. Anche le meteoriti mostrano inconfondibili segni di collisione tra i corpi da cui provengono. Grazie a queste osservazioni comincia a delinearsi la storia dei piccoli corpi del sistema solare.

Alla luce di questi eventi collisionali combinati con le teorie correnti sulla formazione dei pianeti, è istruttivo tracciare la storia evolutiva della popolazione dei piccoli corpi in tre ipotetici sistemi stellari. Il punto di partenza dovrebbe essere il momento in cui in ciascun sistema un sole appena formato è circondato da una nebulosa calda, ma in via di raffreddamento. In quello che chiameremo il sistema A il numero di grani di polvere che condensano inizialmente nella nebulosa è relativamente piccolo; nel sistema C questo numero è relativamente grande. Il sistema B, in cui il numero è intermedio, è rappresentativo del sistema solare. Inizialmente i planetesimali appena condensati hanno dimensioni dell'ordine del micrometro e la loro composizione chimica è determinata dalla composizione chimica e dalla temperatura della nebulosa in via di raffreddamento.

Il successivo stadio evolutivo si basa su un modello di accumulazione planetesimale recentemente proposto da Peter Goldreich del California Institute of Technology e da William R. Ward di Harvard. Ne emergono tre curve a campana completamente diverse. Nel sistema A, in cui il numero di planetesimali era il minore, le particelle dell'ordine del micrometro si sono unite tra loro sotto la forza della mutua attrazione gravitazionale finché i loro diametri medi sono aumentati fino a circa un chilometro. Nel sistema B, con un numero intermedio di planetesimali iniziali, il processo di mutua attrazione ha prodotto quasi lo stesso numero di corpi ingranditi, ma con un diametro medio di molto superiore a un chilometro. Nel sistema C, i planetesimali non solo sono più numerosi, ma sono anche più grandi di quelli degli altri due sistemi. Le storie successive dei tre sistemi ipotetici dipenderanno quindi dal tasso (e dalla violenza) delle collisioni tra questi corpi ingranditi.

Prima di descrivere i successivi sviluppi è interessante notare che esiste un accordo tra i processi ipotetici e le osservazioni astrofisiche effettive. Frank J. Low dell'Università dell'Arizona e altri osservatori hanno scoperto stelle giovani circondate da nebulose di polvere che irradiano nell'infrarosso e sono strettamente simili ai modelli di condensazione di cui abbiamo parlato. La polvere o il fumo, a una temperatura di sole poche centinaia di kelvin, oscura totalmente o parzialmente le stelle centrali. Altre stelle giovani che si possono vedere brillare debolmente attraverso le loro nebulose potrebbero rappresentare sistemi in cui i grani di polvere si sono agglomerati in corpi simili agli asteroidi. Queste combinazioni di stella e nebulosa possono benissimo essere sistemi planetari in formazione.

Cosa accade poi nei tre sistemi ipotetici? I corpi simili ad asteroidi collidono talvolta tra loro. Stretti avvicinamenti alterano le orbite e le particelle con velocità relative diverse cominciano presto a interagire. Nelle collisioni ad alta velocità che seguono, la frammentazione comincia a competere con il processo di crescita continua. La curva a forma di campana che rappresenta le variazioni di dimensioni è alterata perché una successione di collisioni polverizzatrici dà origine a grandi quantità di detriti di piccola scala. La distribuzione di massa riflette ora la legge esponenziale applicabile a masse frammentate.

I prodotti della collisione diminuiscono costantemente di dimensioni mano a mano che collidono e si frammentano. Le particelle al suolo di dimensioni submillimetriche che si sono accumulate sulla Luna durante il ripetuto processo di formazione di crateri ne sono un esempio. La maggior parte di questa polvere fine è probabilmente spazzata via da ciascuno dei tre sistemi, espulsa nello spazio interstellare dalla pressione di radiazione o dal vento stellare. Frammenti più grandi di dimensioni centimetriche possono muoversi a spirale verso la stella centrale spinti dall'effetto di Poynting-Robertson. A questo punto appare un'altra relazione tra ipotesi e osservazione. Per molti anni è rimasto un mistero l'origine della polvere o del fumo interstellare che si rivela mediante l'arrossamento della luce di stelle lontane. Le particelle non potrebbero essersi aggregate nello spazio interstellare dato che non vi sono presenti atomi in numero sufficiente. Qualche anno fa George H. Herbig del Lick Observatory e io indipendentemente abbiamo proposto che la polvere fosse materia protoplanetaria che entrava nello spazio interstellare proveniente dalle nebulose che circondavano stelle di recente formazione, a causa di due processi. Dapprima parte della polvere nebulare originaria sarebbe stata espulsa nello spazio per effetto della pressione di radiazione e del vento interstellare; successivamente i planetesimali in collisione fornirebbero un rifornimento continuo di polvere che viene espulsa nello spazio.

Ritornando agli ipotetici sistemi stellari, i planetesimali potrebbero frammentarsi fino a scomparire del tutto se le velocità di collisione fossero alte. Per la stessa ragione, se alcuni planetesimali crescono fino a dimensioni notevoli durante il periodo iniziale di collisioni a bassa velocità, possono continuare a crescere ancora. Tanto più grande è il corpo, tanto meno probabile è che una successiva collisione lo frantumi o gli sottragga una grande quantità di massa. Inoltre tanto più grande è il corpo, tanto maggiore è il suo campo gravitazionale e la sua capacità di catturare particelle che gli passano vicino. Perciò, una volta che i corpi in accrescimento avessero superato certe dimensioni di soglia, sarebbero rapidamente cresciuti fino a dimensioni planetarie. È questa la ragione per cui un diagramma della distribuzione di massa del nostro sistema solare mostra una sovrabbondanza di massa distribuita tra pochi corpi grandi.

Nel sistema A povero di planetesimali, nessuna accumulazione diventò anche solo grande abbastanza da avvicinarsi alla soglia planetaria. Il processo di frammentazione supera quello di accumulazione, finché alla fine le dimensioni dei soli planetesimali in orbita intorno alla stella sono comprese in una gamma che va da meno di un centimetro a meno di un chilometro. Questi sistemi planetari contengono solo asteroidi. Nel sistema C il rifornimento di planetesimali è abbastanza grande perché corpi in accrescimento in ogni parte del sistema possano superare la soglia planetaria. Alla fine il processo di accumulazione raccoglie quasi tutti i planetesimali con dimensioni da subcentimetriche a subchilometriche. Sistemi come questi possono non contenere neanche un asteroide e possono avere anche due o più soli. Si pensa che circa metà di tutte le stelle appartengano a sistemi di questo tipo.

Il nostro sistema solare assomiglia all'ipotetico sistema B. Perché alcuni dei nostri planetesimali rimasti sono asteroidi e altri comete? Sembra probabile che ne siano responsabili gli effetti perturbanti del massiccio Giove. Anni fa Ernst Öpik dimostrò che le perturbazioni di Giove potevano diffondere ed espellere i planetesimali vicini fino agli estremi confini del sistema solare esterno. Se l'espulsione fosse avvenuta durante le prime fasi dell'evoluzione del sistema solare quando vi era abbondanza di piccoli corpi ghiacciati nel freddo sistema solare esterno, allora l'effetto di diffusione di Giove avrebbe creato un serbatoio altamente congelato di planetesimali: le comete. Sia il sistema B sia il sistema C potrebbero dunque contenere comete.

Altri planetesimali non divennero né polvere interstellare né comete o pianeti, ma furono dispersi su orbite ellittiche dall'interazione coi pianeti vicini e alla fine entrarono in collisione con qualche pianeta o con uno dei satelliti planetari. Le maggiori di queste collisioni possono essere responsabili delle configurazioni attuali di satelliti e di sistemi di anelli. Le più piccole formarono i crateri.

Poiché abbiamo la possibilità di confrontare la densità dei crateri lunari con l'età delle diverse rocce lunari, possiamo ricostruire in dettaglio la sequenza di formazione dei crateri lunari durante i quattro miliardi di anni passati. Quando si formarono le più vecchie rocce lunari note, circa quattro miliardi di anni fa, il tasso di formazione dei crateri era circa 1000 volte superiore a quello attuale. Mezzo miliardo di anni dopo, nell'epoca in cui la lava fluì su vaste zone della Luna, la quantità di planetesimali (e perciò la formazione dei crateri) era diminuita a un valore prossimo a quello attuale.

Queste interpretazioni hanno anche un significato per la geologia terrestre. I primi segni di crateri non sono più visibili sulla superficie della Terra erosa e agitata, ma non tutti i segni degli impatti terrestri sono andati distrutti. Michael R. Dence e altri ricercatori canadesi hanno identificato un certo numero di crateri fossili nello scudo canadese, dove lo strato roccioso ha circa un miliardo di anni. Tenendo conto della differenza tra il campo gravitazionale terrestre e quello lunare si è trovato che il tasso di formazione recente di crateri terrestri si accorda all'incirca con quello lunare. L'azione di alcuni corpi minori del sistema solare ha dunque reso possibile scrivere qualche parola sulle pagine finora bianche della storia della Terra.

Particelle e campi interplanetari

Intercalato da emissioni ad alta energia, soffia dal Sole un vento di particelle cariche le quali interagiscono in modo molto complesso con i campi magnetici dei pianeti

di James A. Van Allen

Il mezzo attraverso il quale la Terra si muove nella sua orbita attorno al Sole contiene in media 10 particelle di materia per centimetro cubo: cinque ioni positivi (per lo più protoni) e cinque elettroni. D'altra parte ci sono qualcosa come 27 000 000 000 000 000 000 molecole in un centimetro cubo di atmosfera terrestre al livello del mare. Dal punto di vista degli standard dei laboratori terrestri, quindi, il mezzo interplanetario costituisce il vuoto perfetto. Si potrebbe pensare che un gas così rarefatto abbia una capacità trascurabile di produrre fenomeni fisici; invece dall'interazione dei campi magnetici del sistema solare con questo «vento» di particelle cariche che soffia dal Sole, scaturisce una varietà di effetti fisici sorprendentemente ricca. Nelle immediate vicinanze della Terra, per esempio, le particelle del vento solare sono catturate dal campo magnetico della Terra e immesse di forza in un sistema di fasce di radiazione che circondano la Terra e che sono a loro volta racchiuse in una regione di forma allungata, chiamata magnetosfera. Quei familiari fenomeni geofisici quali le aurore polari e i disturbi ionosferici associati a tempeste magnetiche, che interrompono le comunicazioni, devono la loro esistenza al complesso legame che corre tra il vento solare e la magnetosfera terrestre.

Sin dall'avvento delle tecniche radioastronomiche più avanzate e dei veicoli interplanetari, si è scoperto che altri pianeti, e in special modo Giove, hanno anch'essi una magnetosfera. I dati più recenti suggeriscono infatti che almeno alcune delle particelle ad alta energia, in precedenza classificate come raggi cosmici di origine galattica, sono in realtà ioni, appartenenti al vento solare, che sono stati accelerati ad alte energie nelle magnetosfere planetarie.

I gas che sono parzialmente o totalmente ionizzati (in altre parole gas nei quali alcuni o tutti gli atomi sono stati spogliati dei loro elettroni) vengono chiamati «plasmi». Poiché un plasma per definizione è composto di particelle cariche, esso può condurre elettricità e quindi può sostenere un suo proprio campo magnetico; in più, fluttuazioni elettrostatiche e altre instabilità entro un plasma possono generare onde elettromagnetiche. I plasmi sono considerati a volte come un quarto stato della materia, tanto marcate sono le differenze tra le loro proprietà fisiche e quelle della materia allo stato solido, liquido, o gassoso neutro. Lo studio teorico e sperimentale dei plasmi costituisce una delle branche più attive della fisica d'oggi, nel tentativo di arrivare alla fusione nucleare controllata in laboratorio come fonte di energia.

Similmente, il ruolo dei plasmi nei sistemi naturali su grande scala è fra gli obiettivi principali della fisica dello spazio. Sebbene le due discipline trattino particelle e campi su scale fisiche enormemente differenti, pure hanno una gran quantità di punti in comune.

Il concetto di radiazione «corpuscolare» emessa dal Sole fu invocato da vari ricercatori tra la fine del XIX secolo e gli inizi del XX, per poter spiegare le aurore polari e le tempeste magnetiche. A quei tempi si supponeva che i corpuscoli fossero elettroni ad alta energia emessi da regioni attive situate sulla superficie del Sole. Più tardi F.A. Lindemann ipotizzò che la radiazione corpuscolare fosse un gas composto di elettroni e ioni positivi, ma che fosse elettricamente neutro nel suo insieme. La velocità di questi «globuli» neutri di gas fu ricavata dal ritardo osservato tra un brillamento solare e la comparsa sulla Terra di un disturbo geomagnetico o di una aurora polare di insolita intensità. Un ritardo di due giorni, ad esempio, corrisponde a una velocità media di 870 chilometri al secondo su una distanza media, tra Sole e Terra, di 150 milioni di chilometri (un'unità astronomica). Durante il periodo tra il 1900 ed il 1940 molti ricercatori, tra i quali Olaf K. Birkeland, Carl Störmer, Sydney Chapman, V.C.A. Ferraro, Julius Bartels e Hannes Alfvén, diedero un notevole contributo alla comprensione degli effetti geofisici dell'impatto di un plasma veloce con il campo magnetico della Terra. Alfvén, in particolare, fu il primo a riconoscere l'importante ruolo sostenuto dal campo magnetico intrinseco del plasma nella generazione dei fenomeni aurorali. Le correnti di particelle possono essere visualizzate con origine in regioni attive del Sole, con la velocità di insieme degli elementi della corrente diretta radialmente dal centro del Sole verso l'esterno. Comunque, a causa della rotazione del Sole, la forma geometrica di tali correnti in un sistema di coordinate non ruotanti sarebbe una spirale di

L'aurora boreale, o « luce del nord », vista dall'alto in questa straordinaria fotografia fatta recentemente da un satellite del Servizio meteorologico dell'aviazione statunitense, è una manifestazione particolarmente significativa del modo in cui la materia proveniente dallo spazio interagisce con il campo magnetico terrestre. Il diafano arco aurorale, una struttura di forma ovale con caratteristici ripiegamenti simili a vortici ogni poche centinaia di chilometri, copre gran parte del Canada centrale in questa immagine; le luci di Chicago e di altre città del nord degli Stati Uniti si possono vedere in basso. Ora si crede generalmente che la luce fluorescente delle aurore polari sia il risultato delle collisioni tra gli atomi e le molecole dell'alta atmosfera e le particelle cariche, dotate di alta energia, provenienti dal Sole, che entrano nell'atmosfera dopo essere state accelerate nella magnetosfera della Terra. Le particelle in arrivo (soprattutto protoni e elettroni) sono guidate verso il basso dalle linee di forza del campo magnetico terrestre, che terminano nelle regioni polari della Terra. La fotografia è stata fornita da Ernest H. Rogers e David F. Nelson della Aerospace Corporation.

Archimede, simile alla forma di un getto d'acqua di una pompa da giardino il cui ugello venga fatto ruotare attorno a un asse perpendicolare al getto uscente (*si veda la figura qui sotto*). In questo modello una particolare corrente spazzerebbe la Terra a intervalli di circa 27 giorni, corrispondenti al periodo apparente di rotazione del Sole visto dalla Terra. Questa caratteristica diede una spiegazione per il periodo di 27 giorni che era stato osservato per alcune alterazioni del campo geomagnetico.

Era stato riconosciuto prima degli anni cinquanta che la coda di una cometa contiene polvere e gas neutro (non ionizzato). I risultati delle osservazioni hanno ora indicato che essa contiene anche gas ionizzato; ciò portò Ludwig F. Biermann a ipotizzare che il gas che fuoriesce dal Sole fosse una caratteristica continua sebbene forse variabile nel tempo, del mezzo interplanetario. In seguito, nel 1958, un esperimento che io avevo progettato per il primo satellite terrestre americano, l'*Explorer I,* rivelò l'esistenza di un grande numero di protoni ed elettroni energetici intrappolati in una coppia di fasce di radiazione del campo magnetico della Terra. Io attribuii l'esistenza di queste particelle all'ingresso del plasma solare, seguito da un processo di accelerazione di natura allora ignota. La scoperta di queste notevoli caratteristiche geofisiche (più tardi chiamate «fasce di Van Allen») portò alla formazione di una nuova importante branca della fisica dello spazio, ora chiamata fisica magnetosferica. Nello stesso anno E.N. Parker pubblicò un importante lavoro teorico sulla emissione di plasma caldo ionizzato dalla corona solare; egli chiamò questo gas «vento solare». Egli inoltre lanciò l'idea che il campo magnetico della regione solare attiva, dove il plasma era stato originato, rimanesse «congelato» nel plasma stesso e fosse portato fuori nello spazio nella forma approssimativa di una spirale di Archimede. La magnetizzazione del gas ionizzato può essere visualizzata, in questo contesto, come l'effetto risultante dal persistere attraverso il gas di un sistema di correnti elettriche.

Il modello a pompa da giardino del vento solare considera il flusso di particelle cariche uscenti dal Sole in rotazione, come avente la stessa forma di un getto d'acqua uscente dall'ugello di una pompa rotante. In questa figura ideale un getto individuale di particelle che emerge da una regione attiva sul Sole è rappresentato dalla sua proiezione sul piano equatoriale solare (come verrebbe visto da un osservatore in quiete sospeso sul polo nord solare). I contorni del getto sono spirali di Archimede; la velocità di ciascun elemento del getto (*frecce in colore*) è diretta radialmente verso l'esterno. Nel disegno questa velocità è di 350 chilometri al secondo, e si è assunto che fosse indipendente dal tempo e dalla distanza dal Sole. Il campo magnetico intrinseco creato dal getto stesso è in ogni punto parallelo alla spirale e diretto sia verso l'esterno rispetto al Sole sia in senso opposto. Questo modello fornisce una buona prima approssimazione delle osservazioni fatte dai veicoli spaziali.

Le prime misure dirette del vento solare furono quelle, piuttosto brevi, fatte nel 1959 con un rivelatore di plasma posto a bordo del veicolo spaziale russo *Luna 3;* due anni più tardi un gruppo americano eseguì misure simili con l'*Explorer 10.* Le più complete (e persuasive) tra le prime osservazioni del vento solare furono fatte nel 1962 con un analizzatore elettrostatico trasportato da *Mariner 2* mentre attraversava lo spazio interplanetario in viaggio verso Venere. Queste osservazioni confermarono il continuo flusso del vento solare e stabilirono le sue proprietà fondamentali: esso consisteva essenzialmente di idrogeno ionizzato (in altre parole protoni ed elettroni); fluiva per lo più radialmente dal Sole e aveva una velocità piuttosto variabile, generalmente compresa tra i 350 e gli 800 chilometri al secondo; aveva inoltre una densità media di 5,4 ioni per centimetro cubo e una temperatura ionica di circa 160 000 kelvin.

Una serie precedente di misure del campo magnetico interplanetario, eseguite dal satellite per lo studio dello spazio *Pioneer 2,* furono confermate e notevolmente estese dalle misure di *Mariner 2.* Si scoprì che l'intensità media del campo magnetico era di circa 6 gamma (sei centomillesimi di gauss); in più la direzione delle linee di forza del campo magnetico, sebbene abbastanza variabile, assomigliava al modello della pompa da giardino. Il lavoro successivo ha messo in evidenza la struttura a settori del campo magnetico interplanetario, la transizione discontinua tra i vettori del campo diretti verso l'interno e quelli diretti verso l'esterno ai confini di questi settori, e la persistenza di una tale struttura per la durata di molte rotazioni solari. Quest'ultima caratteristica fornisce una chiara connessione tra le condizioni magnetiche interplanetarie e quelle localizzate nell'atmosfera del Sole, dove usualmente esistono solo pochi grandi settori.

Misure più dettagliate del vento solare sono state fatte successivamente da più ricercatori, e parecchi esperimenti sono tuttora in corso. Tra questi i più chiarificatori sono quelli condotti dai due ultimi veicoli spaziali Pioneer. *Pioneer 10* ha oltrepassato Giove nel dicembre del 1973 e ora si trova su una traiettoria iperbolica di fuga dal sistema solare. *Pioneer 11* ha oltrepassato Giove un anno più tardi e ora sta dirigendosi verso Saturno, che incontrerà nel settembre 1979 (*si veda la figura a pagina 134*). Lo speciale interesse di queste misure interplanetarie sta nell'estensione della ricerca a distanze molto grandi dal Sole; *Pioneer 10* è già a più di otto unità astronomiche dal Sole, e si sta allontanando dal sistema solare con una velocità di fuga di 2,4 unità astronomiche all'anno. C'è una ragionevole speranza di poter ricevere i dati anche da una distanza radiale di 20 unità astronomiche; una pietra miliare, questa, che verrà raggiunta nell'ottobre del 1979. In contrasto con un'ipotesi teorica che sosteneva il contrario, si è scoperto che le proprietà del vento solare cambiano con la distanza del Sole in modo essenzialmente semplice e continuo. La direzione media del campo magnetico continua a seguire il modello della pompa da giardino; a cinque unità astronomiche le linee del campo magnetico giacciono approssimativamente sul piano centrale del sistema solare ma formano quasi un angolo retto con una linea che unisca il veicolo spaziale e il Sole (un modo alternativo di vedere le cose è quello di supporre che la grandezza della componente radiale del campo magnetico sia diminuita come l'inverso del quadrato della distanza dal Sole, mentre quella della componente azimutale sia diminuita come il semplice inverso). Continuano inoltre a esserci fluttuazioni nell'intensità del campo magnetico, simili a quelle osservate in vicinanza dell'orbita della Terra, sino a una distanza di almeno cinque unità astronomiche.

Misure simultanee del vento solare vengono eseguite dal veicolo spaziale Pioneer usando un analizzatore di plasma molto complesso che determina la velocità di insieme, la temperatura ionica, la composizione ionica e la densità degli ioni. La velocità media del vento solare cambia impercettibilmente tra una e cinque unità astronomiche, diminuisce invece marcatamente la grandezza delle fluttuazioni. Quest'ultima caratteristica sembra essere causata dall'interazione tra correnti di ioni veloci e lente, che produce una tendenza verso l'uniformità. La temperatura ionica media risulta aumentata di circa un fattore due e la densità ionica media risulta essere diminuita approssimativamente come l'inverso del quadrato della distanza dal Sole. Quest'ultimo risultato corrisponde a un flusso radiale a simmetria sferica, sebbene le fluttuazioni casuali siano così grandi da precludere un test accurato della legge dell'inverso del quadrato.

Nel frattempo il veicolo spaziale tedesco-americano *Helios* ha eseguito delle misure sul vento solare e sul campo magnetico interplanetario entro l'orbita della Terra; questo veicolo ha raggiunto il punto più vicino al Sole alla metà di marzo del 1975, a una distanza dal centro solare minore di un terzo di unità astronomica. Un esperimento di particolare interesse a bordo dell'*Helios* è quello

inteso a misurare il rumore radio generato entro il mezzo interplanetario stesso; questo rumore, in un intervallo di frequenza tra 10 e 100 000 hertz, è un fenomeno rivelatore della instabilità del plasma e dei meccanismi mediante i quali avviene lo scambio di energia tra protoni ed elettroni in un plasma caldo.

Finora ogni misura diretta del vento solare è stata fatta entro meno di nove gradi dal piano equatoriale solare, che è a sua volta inclinato di sette gradi rispetto all'eclittica (il piano dell'orbita terrestre). Vi sono due ragioni per questo fatto: primo, l'effetto «fionda» della velocità orbitale terrestre (30 chilometri al secondo) è una delle caratteristiche fondamentali della dinamica del lancio di ogni veicolo spaziale interplanetario. In pratica, per un'orbita circolare di raggio pari a una unità astronomica, un'inclinazione di 20 gradi rispetto all'eclittica è il limite superiore pratico per l'esistenza della possibilità di lanciare un veicolo spaziale. Secondo, le misure del vento solare sono state fatte, nella maggior parte dei casi, da veicoli spaziali con più compiti che sono progettati per passare a una distanza ravvicinata dai pianeti e che quindi richiedono orbite su un piano solo leggermente inclinato rispetto all'eclittica. Dati importanti, ma meno quantitativi, sulle proprietà del vento solare a più alte latitudini solari si stanno ottenendo con altri metodi, come l'osservazione della coda delle comete e l'analisi della scintillazione indotta sui segnali radio provenienti da sorgenti stellari dalle irregolarità del plasma interplanetario.

Osservazioni da terra del disco solare mostrano che l'attività solare non è a simmetria sferica ma dipende piuttosto fortemente dalla latitudine solare. A causa di questo fatto molti ricercatori sentono l'esigenza di osservazioni dirette alle latitudini solari più alte. Una missione fuori eclittica può essere perseguita da un veicolo spaziale che sfiori Giove in modo tale che la sua traiettoria seguente sia inclinata di 90 gradi sull'eclittica e passi sopra il polo del Sole a una distanza di un'unità astronomica. Un'altra possibilità è quella di inclinare gradualmente il piano orbitale di un veicolo spaziale che orbiti attorno al Sole alla distanza di una unità astronomica, fino a un'inclinazione di circa 40 gradi con la tecnica della propulsione elettrica solare. Questa tecnica utilizza la luce del Sole raccolta da cellule solari per generare elettricità che a sua volta viene usata per far funzionare un «cannone a ioni» che fornisce la propulsione ausiliaria.

Una missione fuori eclittica dovrebbe per prima cosa permettere ai ricercatori di studiare il mezzo interplanetario in tre dimensioni. Una tale missione dovrebbe anche rendere possibile ottenere buone osservazioni delle regioni polari del Sole stesso. Nel frattempo i migliori dati saranno quelli ottenuti da *Pioneer 11,* che raggiungerà una latitudine solare massima di 20 gradi a una distanza di cinque unità astronomiche agli inizi del 1977 nel suo viaggio verso Saturno.

Il moto del vento solare verso l'esterno si arresta presumibilmente in qualche punto a causa del suo incontro con il gas interstellare, che si stima avere una densità di meno di un atomo per centimetro cubo in vicinanza del sistema solare. Questa ipotetica linea di confine è stata chiamata «eliopausa». La velocità del sistema solare rispetto alle stelle vicine è di circa 20 chilometri al secondo verso un punto del cielo chiamato «apice solare». In base all'ipotesi che il gas interstellare sia in quiete rispetto a questo sistema di riferimento, la distanza dell'eliopausa dal Sole è presumibilmente minore nella direzione dell'apice solare, a causa della velocità contraria del gas interstellare in quella direzione. Stime teoriche di questa distanza hanno dato risultati che variano tra 5 e 300 unità astronomiche. Gli strumenti a bordo del *Pioneer 10* non hanno mostrato alcuna evidenza di una tale transizione sino a otto unità astronomiche; sfortunatamente il veicolo spaziale si sta ora allontanando dal Sole in una direzione quasi opposta a quella dell'apice solare.

Fin qui le proprietà del vento solare in quanto tale. Cosa si può dire circa le sue proprietà in quanto mezzo attraverso il quale viaggiano particelle cariche dotate di energie molto più grandi? Le collisioni tra le particelle sono in questo caso per lo più di scarso interesse, dal mo-

La magnetosfera della Terra, una cavità allungata ricavata entro il vento solare dal campo geomagnetico è stata osservata da un buon numero di veicoli spaziali statunitensi, a cominciare dalle prime serie di Explorer, che verso la fine degli anni cinquanta rivelarono l'esistenza di quel sistema, relativamente vicino, di fasce di radiazione che portano il nome dell'autore. Osservazioni dettagliate del campo magnetico nell'intorno dell'onda d'urto di prua che separa la magnetosfera dal vento solare, sono eseguite correntemente dal gruppo di ricercatori cui appartiene l'autore, all'Università dello Iowa, facendo uso di un magnetometro molto sensibile installato a bordo del satellite artificiale terrestre *Hawkeye 1*. L'orbita di questo veicolo spaziale (*ellisse in colore tratteggiata*) giace su un piano che forma un angolo retto con il piano equatoriale terrestre, e ha il suo apogeo, o punto più distante dalla Terra, posto al di sopra del polo nord a una distanza radiale di 21 raggi terrestri (più di 133 000 chilometri). Recenti misure della direzione del campo magnetico interplanetario al di fuori della magnetosfera terrestre, derivate dai dati forniti dallo *Hawkeye 1*, confermano il modello a pompa da giardino del vento solare.

È stato osservato che l'intensità dei raggi cosmici varia con un periodo di 11 anni approssimativamente in sincronismo con il ciclo di 11 anni delle macchie solari, osservato ormai da un lungo periodo di tempo, con il valore massimo di intensità dei raggi cosmici coincidente con il minimo dell'attivtià solare e viceversa. Questa relazione inversa, scoperta in origine dai risultati di osservazioni eseguite sulla Terra, è stata ora confermata da rivelatori montati su satelliti artificiali. La prima curva a sinistra mostra la variazione dell'attività solare nel periodo che va dal 1750 al 1975. La seconda curva mostra i risultati di uno studio condotto per 6 anni dall'autore sull'intensità dei protoni ad alta energia, che fanno parte dei raggi cosmici nel mezzo interplanetario, a una distanza di circa una unità astronomica dal Sole. Il rivelatore usato per eseguire le misure è situato sul veicolo spaziale *Explorer 35* che orbita attorno alla Luna. La forma generale della curva rappresenta la variazione dei raggi cosmici; i numerosi picchi sono causati da particelle ad alta energia provenienti dal Sole. Si noti come l'intensità dei raggi cosmici presenti un minimo attorno al 1969-1970, vicino quindi al periodo di massima attività solare.

mento che il cammino libero medio per tali collisioni è dell'ordine di 100 unità astronomiche. Le particelle cariche ad alta energia interagiscono con il mezzo interplanetario soprattutto attraverso «gobbe», o irregolarità, del campo magnetico proprio del plasma. Ogni particella carica che si muove attraverso un campo magnetico uniforme è costretta a percorrere una traiettoria elicoidale con l'asse dell'elica allineato con le linee di forza del campo magnetico. Il raggio dell'elica è direttamente proporzionale alla quantità di moto della particella e inversamente proporzionale all'intensità del campo magnetico. Una particella con il raggio dell'orbita abbastanza piccolo rispetto al raggio di curvatura di una gobba del campo magnetico locale si muove lungo un percorso elicoidale il cui centro di curvatura, o centro di guida, segue approssimativamente le linee del campo magnetico. Una particella, invece, con il raggio orbitale maggiore della curvatura della gobba, si trova a essere solo leggermente influenzata nel suo moto, e si muove lungo una traiettoria corrispondente alle caratteristiche a scala maggiore del campo magnetico. Una particella con un raggio orbitale paragonabile alla curvatura del campo, comunque, si troverebbe spesso con una traiettoria completamente diversa. Quest'ultimo processo è chiamato diffusione da parte di un'irregolarità magnetica. Recenti misure del campo magnetico nel mezzo interplanetario, oltre a mostrare la tendenza media verso il modello della pompa da giardino, danno indicazioni su molte irregolarità locali sia nella direzione sia nell'intensità del campo magnetico.

Nel 1954 Scott E. Forbush pubblicò i risultati di una lunga serie di osservazioni, eseguite da terra, che mostravano che l'intensità dei prodotti secondari dei raggi cosmici galattici ha una periodicità di 11 anni sincronizzata approssimativamente con il ciclo undecennale dell'attività solare. Il massimo valore dell'intensità dei raggi cosmici si ha durante il minimo dell'attività solare e viceversa. Questo effetto può essere spiegato nel modo seguente: i raggi cosmici provenienti da sorgenti lontane si avvicinano al sistema solare da tutte le direzioni più o meno uniformemente. Come entrano nel sistema solare vengono deviati dalle irregolarità magnetiche del mezzo interplanetario. A causa del moto radiale verso l'esterno di tali irregolarità, le collisioni danno alle velocità delle particelle deviate una componente piccola ma generalmente diretta verso l'esterno. Questo effetto tende a diminuire l'intensità dei raggi cosmici entro il sistema solare, e la sua importanza è maggiore durante i periodi in cui è massima l'attività solare e quindi sono massime la velocità media del vento solare e la turbolenza magnetica. L'intensità totale della radiazione cosmica galattica all'altezza dell'orbita terrestre è due volte più forte durante un minimo solare di quanto non lo sia durante un massimo solare. Questo fattore di modulazione è massimo alle energie più basse e diviene trascurabile a energie al di sopra di 10^{11} elettronvolt. Presumibilmente l'intensità dei raggi cosmici galattici in vicinanza del sistema solare, ma abbastanza lontano dal Sole per non essere affetta dall'influenza del campo magnetico interplanetario, rimane costante per periodi di tempo forse dell'ordine di milioni di anni, e certamente ben più lunghi di 11 anni. Un necessario corollario, quindi, delle variazioni temporali osservate nei raggi cosmici galattici deve essere un gradiente radiale di intensità diretto dal Sole verso l'esterno.

Da un punto di vista teorico entrambi gli effetti si dovrebbero poter calcolare in base all'incidenza osservata delle irregolarità magnetiche, e a una forma assunta dello spettro di energia della radiazione cosmica galattica nello spazio interstellare.

Gli sforzi teorici per risolvere questo difficile problema di convezione-diffusione sono stati illuminati ma, almeno fino a ora, di ben poco successo.

Le misure dirette dell'intensità totale dei raggi cosmici con il *Pioneer 10* e il *Pioneer 11* mostrano un gradiente essenzialmente nullo tra una e otto unità astronomiche di distanza dal Sole, laddove le teorie prevalenti predicono un aumento dell'ordine del 60 per cento entro il medesimo intervallo di distanza. Questi risultati suggeriscono che l'eliopausa sia in effetti molto più lontana dal Sole di otto unità astronomiche.

Le due ultime missioni Pioneer hanno esteso la ricerca sul vento solare a distanze molto grandi dal Sole. Questo diagramma tridimensionale mostra le traiettorie di *Pioneer 10* (lanciato il 3 marzo 1972), e di *Pioneer 11* (lanciato il 6 aprile 1973) in relazione all'eclittica (il piano dell'orbita terrestre). I punti in nero rappresentano la posizione del veicolo spaziale all'inizio di ciascun mese in un sistema di coordinate eliocentriche, con la longitudine misurata in senso antiorario a partire dall'equinozio di primavera. Le discontinuità nelle traiettorie dei due veicoli spaziali sono state causate dal passaggio in prossimità di Giove il 4 dicembre 1973 (*Pioneer 10*) e il 3 dicembre 1974 (*Pioneer 11*). L'apice solare indica la direzione del moto del Sole.

Un'altra importante classe di particelle energetiche nel sistema solare comprende le particelle emesse durante i brillamenti solari. Il primo chiaro esempio di questo fenomeno fu osservato da Forbush e altri nel 1942 con camere a ionizzazione poste a terra. Da allora per un certo numero di anni furono osservati solo pochi altri casi analoghi. Palloni stratosferici, razzi, satelliti artificiali e veicoli spaziali interplanetari hanno ora aumentato enormemente la conoscenza, dal punto di vista osservativo, di queste particelle solari ad alta energia. Il campo coperto dalle energie delle particelle (che una volta erano chiamate raggi cosmici solari) si estende da poche migliaia sino a centinaia di milioni di elettronvolt.

Tra le particelle finora identificate ci sono gli elettroni, i protoni e i nuclei di elio, carbonio, azoto, ossigeno e di atomi più pesanti, tutti presenti nell'atmosfera solare. Protoni ed elettroni sono le specie dominanti, come si potrebbe prevedere considerando che l'idrogeno è l'elemento più abbondante nell'atmosfera solare e che gli elettroni sono uno dei costituenti universali della materia. Queste particelle sono accelerate durante la fase iniziale di esplosione dei brillamenti solari, sfuggono dal Sole e si diffondono attraverso il campo magnetico interplanetario. Gli elettroni, a causa della loro più alta velocità, usualmente mostrano un profilo abbastanza regolare dell'intensità rispetto al tempo, come ci si potrebbe attendere per il fenomeno della diffusione attraverso un mezzo formato da centri di diffusione in quiete. Lo stesso vale per i protoni con energie dell'ordine di 100 milioni di elettronvolt e più. I protoni con energie più basse e gli ioni più pesanti, comunque, mostrano dei profili dell'intensità rispetto al tempo molto complessi, e «punte» di intensità dei protoni sono spesso associate con onde d'urto e altre discontinuità nel mezzo interplanetario.

Questa differenza qualitativa si comprende considerando semplicemente il fatto che la velocità di un protone con una energia cinetica di 300 000 elettronvolt (un valore tipico) è solo 20 volte superiore a quella del vento solare. Al contrario, la velocità di un tipico elettrone con un'energia cinetica di 30 000 elettronvolt è più di 250 volte maggiore di quella del vento solare. Il risultato è che il moto degli ioni di energia più bassa è fortemente influenzato da effetti convettivi causati dal moto verso l'esterno dei centri di diffusione magnetici. In più le loro energie vengono modificate dalle collisioni con onde d'urto interplanetarie e altre discontinuità in movimento.

Centinaia di eventi distinti riguardanti particelle solari ad alta energia sono stati osservati con grande dettaglio da stru-

Preziose informazioni sulle proprietà del vento solare possono essere ottenute dallo studio della coda delle comete, che per un certo periodo mostrano due distinte componenti: una consistente di polveri e gas neutro (non ionizzato) e l'altra consistente di gas ionizzato. Nella maggior parte delle fotografie di comete la coda di polveri (che generalmente segue la coda di gas ionizzato) è la componente più importante. In questa fotografia della cometa Mrkos, fatta il 23 agosto 1957 con il telescopio Schmidt da 120 centimetri di Monte Palomar, i due tipi di coda si possono distinguere con chiarezza. La coda di gas ionizzato con una struttura molto complessa, spinta radialmente in senso opposto al Sole dal vento solare, precede attraverso il cielo la coda di polveri di aspetto diffuso e meno dettagliato (il moto della cometa nella fotografia avviene verso sinistra e verso l'alto). La cometa Mrkos ha raggiunto il punto più vicino al Sole, a una distanza di 0,355 unità astronomiche, il primo agosto; nel momento in cui è stata scattata la fotografia la cometa si stava allontanando ed era a una distanza di 0,76 unità astronomiche dal Sole e di 1,21 unità astronomiche dalla Terra.

Si crede che l'eliosfera, una regione allungata che assomiglia alla magnetosfera terrestre, racchiuda l'intero sistema solare nel suo viaggio attraverso gli spazi interstellari (il sistema solare si muove rispetto alle stelle vicine a una velocità di circa 20 chilometri al secondo in direzione dell'apice solare). Il confine ipotetico dove il flusso del vento solare viene arrestato dall'incontro con il mezzo interstellare molto più rarefatto, è chiamato eliopausa. A causa della opposta velocità (relativa) del gas interstellare nella direzione dell'apice solare, la distanza dell'eliopausa dal Sole è presumibilmente minore in questa direzione. Stime teoriche di questa distanza danno valori che vanno da 6 a 300 unità astronomiche; sinora *Pioneer 10* non ha trovato alcun indizio dell'esistenza di una tale transizione fino alla distanza di otto unità astronomiche. In questa figura l'eliopausa è disegnata arbitrariamente a una distanza di 75 unità astronomiche dal Sole. Le ellissi grigie sono orbite planetarie.

menti montati a bordo di veicoli spaziali. Molti eventi sono stati osservati da due o più veicoli da punti molto distanti. Ogni evento risulta differente in caratteristiche dettagliate. Si eseguono comunemente osservazioni degli spettri di distribuzione dell'energia, dell'abbondanza degli elettroni, dell'abbondanza dei nuclei dei vari elementi e della distribuzione di ciascun costituente rispetto all'angolo e all'intensità per un certo periodo di tempo. Le caratteristiche generali e le curve di intensità rispetto al tempo per gli elettroni si possono comprendere a grandi linee in termini di diffusione nel campo magnetico interplanetario, quelle relative agli ioni (in particolare agli ioni di più bassa energia) d'altra parte sono molto più complesse, e riflettono sia effetti di trasporto convettivo sia processi di accelerazione locali con effetti di diffusione. Alle volte i processi convettivi sono sufficientemente dominanti da creare un gradiente radiale positivo di intensità verso la fine di un evento; a questo punto il flusso di diffusione è rivolto in direzione del Sole piuttosto che nella direzione opposta dalla sorgente originale all'esterno, come avviene agli inizi dell'evento. Intensità di particelle dell'ordine di mezzo milione di protoni per centimetro quadrato e per secondo sono state osservate a energie maggiori di 300 000 elettronvolt. Eventi di particolare intensità durano per parecchi giorni, e possono presentare un notevole periodo di irradiazione per missioni spaziali di lunga durata con uomini a bordo. La maggior parte di questi eventi caratterizzati da particelle ad alta energia è stata definitivamente identificata con brillamenti solari osservati; quelli per i quali una tale identificazione non è possibile possono ragionevolmente essere attribuiti a brillamenti avvenuti sull'emisfero nascosto del Sole.

Il processo mediante il quale le particelle vengono accelerate nei brillamenti solari si pensa sia associato con il collasso di un campo magnetico nel luogo dove si trova il brillamento stesso. Le intensità relative delle varie specie di ioni ripetono approssimativamente le abbondanze relative dei corrispondenti atomi nell'atmosfera solare, determinate con i metodi spettroscopici tradizionali. È stato ipotizzato che studiando le abbondanze relative delle varie specie di ioni solari ad alta energia si potrebbe ricavare una buona stima delle abbondanze relative degli elementi nel Sole. Sfortunatamente le intensità relative degli ioni osservate variano con l'energia, variano da evento a evento e variano con il tempo durante i singoli eventi. Sembra inoltre che sia durante il processo di accelerazione sia durante la propagazione nel mezzo interplanetario, entrino in gioco effetti differenziali; tali variazioni sono più pronunciate alle energie più basse.

Da tutto quanto è stato detto sin qui appare chiaro che il Sole è il maggiore responsabile nel produrre fenomeni che coinvolgono particelle e campi nello spazio interplanetario. Ciò non di meno, le magnetosfere della Terra e di Giove sono dei microcosmi di tali fenomeni; in questi microcosmi hanno un ruolo centrale campi elettrici sia a grande scala sia fluttuanti. Le magnetosfere della Terra e di Giove sono conosciute come deboli emettitrici di particelle ad alta energia.

Se l'eliosfera è grande parecchie centinaia di unità astronomiche, non è per questo irragionevole considerare la possibilità, come Alfvén ha fatto da tempo, che una frazione significativa della radiazione cosmica galattica (particelle con un'energia minore, diciamo, di 10 elettronvolt) abbia origine entro il sistema solare. Questa possibilità, comunque, è contraria al punto di vista prevalente che attribuisce l'origine di tutti i raggi cosmici a processi stellari e interstellari.

Il mezzo interplanetario è attraversato da ogni specie di onde elettromagnetiche, che hanno origine dal Sole, dai pianeti, e da sorgenti al di fuori del sistema solare. Onde elettromagnetiche, la cui frequenza è minore della frequenza locale di plasma nel mezzo interplanetario, vengono assorbite in vicinanza della sorgente e non possono propagarsi. Questa frequenza limite è proporzionale alla radice quadrata dell'intensità locale degli elettroni. A una distanza di una unità astronomica dal Sole, per esempio, la frequenza limite è di 20 000 hertz; come risultato nessuna onda elettromagnetica di frequenza più bassa può giungere in vicinanza della Terra. Sopra questa frequenza la propagazione delle onde elettromagnetiche è influenzata in vari modi, ma l'effetto del mezzo interplanetario diminuisce con l'aumento della frequenza, ed è trascurabile a frequenze superiori ai 100 milioni di hertz.

L'origine e l'evoluzione del sistema solare

Si ammette generalmente che il Sole e i pianeti si siano formati circa 4,6 miliardi di anni fa da un disco rotante di polvere e gas. Come questo sia accaduto resta uno dei problemi più discussi

di A. G. W. Cameron

Una grande nube di gas e polvere si contrasse nello spazio interstellare 4,6 miliardi di anni fa lungo uno dei bracci curvi della nostra galassia a spirale, lontano dal suo centro. La nube collassò e ruotò più rapidamente, formando un disco. A un certo punto si accumulò al centro del disco un corpo tanto massiccio, denso e caldo da far innescare il suo combustibile nucleare e diventare così una stella: il Sole. A un certo stadio le particelle di polvere circostanti si aggregarono, formando pianeti orbitanti intorno al Sole e satelliti orbitanti intorno ad alcuni pianeti.

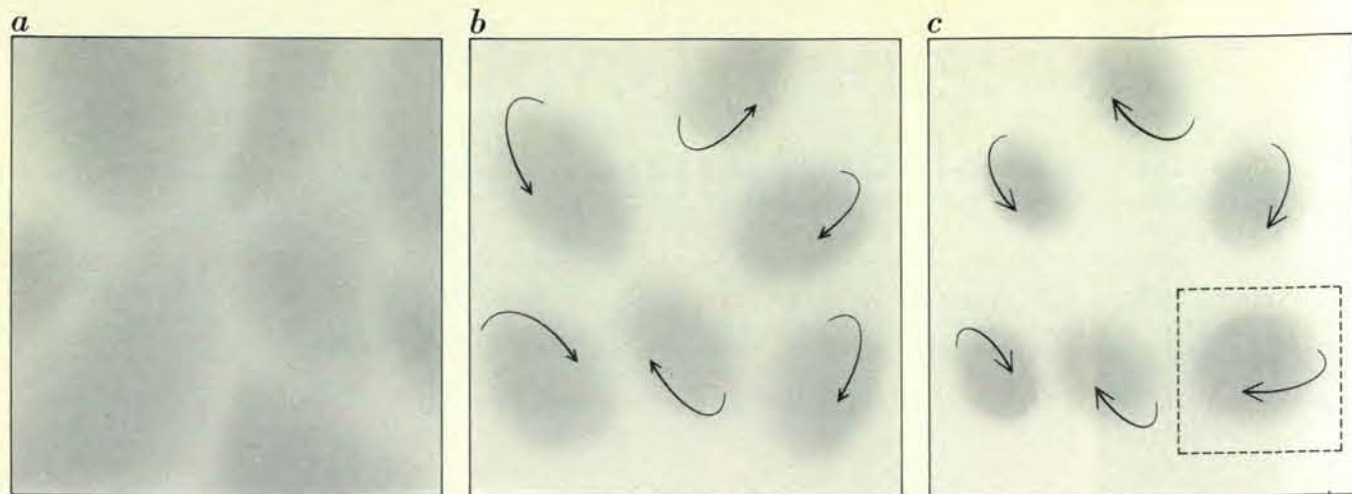
Questa è – in modo molto approssimato – l'ipotesi della nebulosa sull'origine del sistema solare, la cui idea centrale venne formulata più di 300 anni fa. Suona abbastanza semplice e appare intuitiva al profano; in fondo una qualche versione di essa è accettata oggi dalla maggior parte degli astronomi. Eppure, a parte le linee generali, gli studiosi dell'origine e dell'evoluzione del sistema solare, non hanno ancora uniformemente accettato una teoria che spieghi come si è formata la nebulosa solare primordiale, come e quando il Sole cominciò a brillare e come e quando i pianeti si coagularono dalla polvere che girava vorticosamente.

Fu Cartesio a proporre per primo (nel 1644) la teoria di una nebulosa solare primordiale: un disco ruotante di gas e polvere da cui si formarono i pianeti e i loro satelliti. Un secolo dopo (nel 1745) Georges Louis Leclerc de Buffon avanzò una seconda teoria: un corpo massiccio (egli suggerì una cometa) si avvicinò al Sole e strappò a esso della materia che costituì i pianeti e i loro satelliti. Nei due secoli successivi a Buffon le numerose teorie che vennero proposte erano inclini a seguire nella tradizione o l'idea monistica di Cartesio o quella dualistica di Buffon. Le più significative delle prime teorie monistiche furono quelle di Immanuel Kant e di Pierre Simon de Laplace, che, partendo dall'idea di Cartesio, tentarono di spiegare come la nube di gas e di polvere, contraendosi per formare il Sole, si fosse messa a ruotare sempre più velocemente a causa della conservazione del momento della quantità di moto: una diminuzione del raggio della massa in rotazione deve, infatti, essere bilanciata da un incremento della sua velocità rotazionale. Secondo Laplace, dalla nube primordiale si separò una serie di anelli, la cui polvere formò i pianeti e i satelliti. Alla fine del XIX secolo, poiché l'ipotesi della nebulosa non era in grado di spiegare il fenomeno dell'« accrezione » di materia nei pianeti, tornarono di nuovo in auge le teorie dualistiche. Oggi sono generalmente abbandonate; sembra chiaro che la maggior parte della materia che può essere stata asportata dal Sole, per esempio per l'avvicinamento di un'altra stella, avrebbe dovuto ricadere sul Sole o essere dispersa nello spazio prima che, condensandosi in qualcosa di solido, potesse coagularsi dando origine ai pianeti.

Una delle ragioni principali della grande disparità delle prime teorie sull'origine del sistema solare fu la mancanza di dati di osservazione, di fatti cioè a cui applicare una teoria. La storia delle prime centinaia di milioni di anni della Terra manca della documentazione geologica e non può dunque offrire schiarimenti sulle condizioni ambientali in cui nacque il nostro pianeta; inoltre le scarse capacità dei telescopi limitavano fino a poco tempo fa i dati astronomici. Le prime teorie furono sviluppate per spiegare un numero esiguo di dati di osservazione: la distanza delle orbite planetarie cresceva in modo regolare (in accordo con quella che è nota come legge di Bode); i moti orbitali dei pianeti e la loro rotazione tendevano ad avvenire nello stesso senso; il Sole spiegava solo una piccola frazione del momento della quantità di moto totale del sistema solare, anche se la sua massa rappresentava indubbiamente la frazione di gran lunga maggiore della massa totale del sistema. Su queste poche osservazioni potevano evidentemente svilupparsi le teorie più diverse.

Solo negli ultimi tre decenni la situazione cambiò radicalmente. Possediamo oggi una grande quantità di nuove conoscenze che impongono precisi vincoli a qualsiasi teoria. Tali conoscenze provengono soprattutto dalle nuove ricerche sulle meteoriti e dai dati trasmessi a Terra dalle sonde inviate verso altri corpi del sistema solare.

Le meteoriti sono campioni del materiale primordiale del sistema solare. Sono chiaramente frammenti di corpi di dimensioni piuttosto piccole che so-

Nuove stelle nascono, come può essere nato il Sole, entro nebulose gassose in emissione: nubi diffuse di caldo gas interstellare. La fotografia della pagina a fronte, eseguita con il telescopio riflettore Mayall di quattro metri del Kitt Peak National Observatory in Arizona, riproduce la nebulosa indicata come nebulosa dell'Aquila situata nel nostro braccio della Galassia. Entro la nebulosa si sono condensate, in epoca relativamente recente, nubi di gas: esse hanno formato brillanti stelle bianche e blu; altre nubi simili sono ancora in fase di condensazione. La radiazione ultravioletta di queste nuove stelle « calde » ionizza gli atomi di idrogeno del restante gas, dando origine a elettroni e protoni liberi. Quando gli elettroni di alta energia si ricombinano coi protoni, viene emessa una radiazione avente la lunghezza d'onda della riga alfa dell'idrogeno: si tratta di una radiazione rossa che illumina la nube e delimita il contorno di regioni della nebulosa dense, polverose e più fredde, dove la luce non penetra.

Le galassie si sono formate in un gas primordiale rarefatto e in espansione quando regioni di densità alquanto superiore (*a*) si contrassero gravitazionalmente per formare protogalassie (*b*), ruotando per effetto dei vortici gassosi in esse contenuti. Le protogalassie continuarono a contrarsi e perciò a ruotare più velocemente (*c*). Una di esse (*nel quadrato*) era la nostra galassia.

no venuti in collisione tra loro frammentandosi e inviando molti dei pezzi in nuove orbite che hanno finito coll'intersecare quella terrestre. Le meteoriti ci forniscono, racchiusi nel loro interno, campioni dei gas della nebulosa solare. I minerali in esse contenuti forniscono chiarimenti sulle temperature e pressioni della nebulosa, quando i loro singoli granuli subirono per l'ultima volta le reazioni chimiche con i gas della nebulosa. Dalle quantità relative dei prodotti di decadimento radioattivo che rimangono racchiusi nell'interno delle meteoriti possiamo risalire all'epoca in cui gli elementi originali, che hanno dato origine agli isotopi radioattivi, si unirono per dare origine ai corpi da cui si sono formate le meteoriti.

Uno dei principali scopi scientifici del programma di sonde spaziali fu l'approfondimento delle conoscenze sull'origine del sistema solare e tale programma ha dato in effetti i suoi frutti. I dati forniti dai veicoli spaziali hanno migliorato la nostra conoscenza sulle masse e sui raggi planetari, dai quali si possono ricavare le precise densità medie dei pianeti e molte indicazioni sulla loro composizione interna. Osservando come i potenziali gravitazionali di un pianeta differiscono da quelli di una sfera perfettamente omogenea si ricavano i limiti alla misura in cui può variare la densità nelle diverse parti dell'interno del pianeta. Sapere se un pianeta possiede o meno un campo magnetico intrinseco ci fornisce alcune informazioni sulla dinamica interna del pianeta stesso. Inoltre i dati dei veicoli spaziali sulla composizione di un'atmosfera planetaria rivelano qualcosa sui gas che erano un volta incorporati nel pianeta e sulle interazioni chimiche tra atmosfera e superficie planetaria. Esaminando le immagini, incredibilmente nitide, delle superfici dei pianeti che sono state scattate dagli apparecchi fotografici installati sui veicoli spaziali, possiamo vedere quale è stata l'azione su altri pianeti dei processi vulcanici e degli altri processi geologici. La densità dei crateri ci fornisce informazioni sugli stadi finali di accrezione del pianeta e sul numero di corpi più piccoli che hanno vagato per il sistema solare.

Ulteriori vincoli ci vengono dai recenti progressi compiuti dall'astrofisica. Sappiamo ora che la nostra galassia è nel suo insieme da due a tre volte più vecchia del sistema solare; abbiamo perciò buone ragioni per ritenere che le condizioni che osserviamo su di essa non siano molto diverse da quelle esistenti al momento della formazione del sistema solare. Vi sono regioni galattiche in cui si sono formate stelle in un passato recente e in cui si stanno probabilmente formando tuttora; ciò offre importanti informazioni a sostegno dell'ipotesi che il Sole e la nebulosa solare si siano formati come parti di uno stesso processo generale. Abbiamo appreso molto sulla nascita e la morte delle stelle, su come abbiano avuto origine gli elementi in reazioni nucleari all'interno di stelle in esplosione e si siano uniti in granuli di polvere interstellare e su come questi granuli si siano concentrati formando nel cielo macchie scure che impediscono alla luce di stelle distanti di giungere fino a noi. Questi granuli di polvere e i gas interstellari che li accompagnano costituivano, probabilmente, la materia grezza della nebulosa solare.

Cerchiamo ora di collegare tutti i dati che abbiamo a disposizione in un quadro coerente che spieghi la formazione del sistema solare.

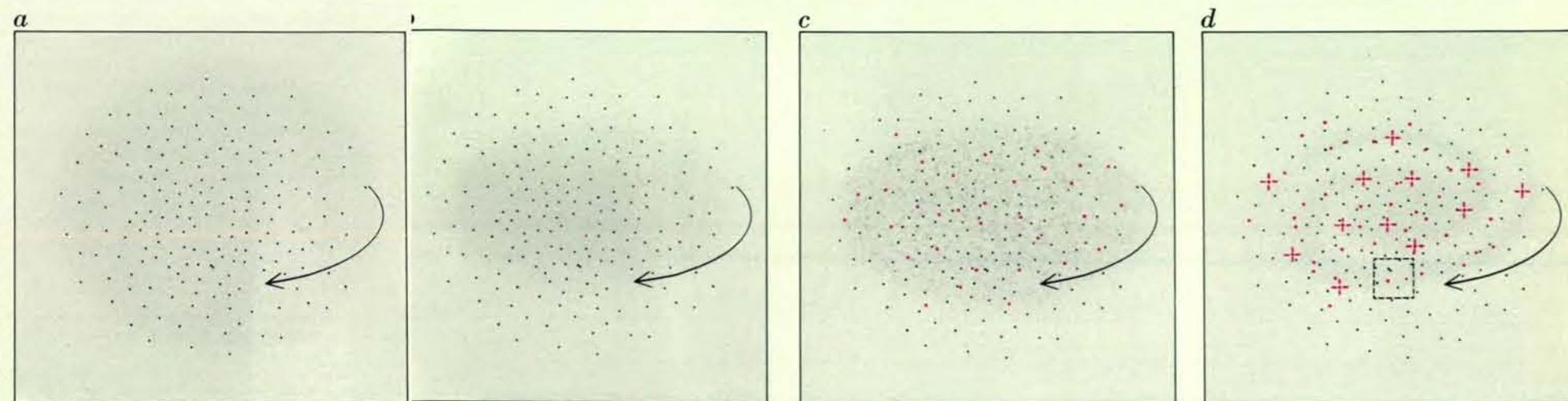
Le galassie si formano quando il gas – soprattutto idrogeno – collassa dallo spazio intergalattico. La nostra galassia cominciò a prendere forma in questo modo molti miliardi di anni prima dell'origine del sistema solare. Dal gas che stava collassando nacque una prima generazione di stelle le quali sono ancora distribuite entro una sfera che circonda il centro galattico, come reminiscenza della forma originale grossolanamente sferica. Dopo la formazione di queste prime stelle, il gas residuo, a causa del momento intrinseco della quantità di moto, si trasformò in un disco che rappresenta la configurazione caratteristica di tutte le galassie a spirale; una successiva generazione di stelle si formò dal gas del disco. Le più massicce di esse ebbero una rapida evoluzione, formando elementi pesanti che furono espulsi nel gas interstellare. Alcuni elementi pesanti condensarono in granuli: la polvere interstellare. Quando si fu formato un numero sufficiente di stelle nel piano centrale della Galassia, si sviluppò una instabilità nei moti stellari che favorì la loro temporanea aggregazione dando luogo alla formazione di bracci a spirale.

Questi bracci rappresentano aumenti locali della densità di popolazione stellare nel disco; i bracci sono elementi caratteristici permanenti che ruotano intorno al centro della Galassia, ma la materia di cui sono fatti varia: le singole stelle restano solo circa la metà della loro vita su un braccio prima di spostarsi sul successivo. Come le stelle, anche il gas e la polvere interstellare rimangono su un braccio per lo stesso tempo circa che impiegano per attraversare lo spazio ben maggiore che li separa da quello successivo; ne risulta che la densità del gas e dela polvere è notevolmente superiore alla media in un braccio a spirale. Sappiamo dagli studi compiuti nelle galassie diverse dalla nostra che è proprio in questi bracci a spirale di alta densità che si formano le nuove stelle.

Entro il gas si formano differenze di pressione, forse come conseguenza della esplosione di supernove; il gas fuoriesce dalle regioni a densità superiore, ma nel suo moto tende ad ammassarsi in qualche altro luogo. Si accumulano nubi di gas non ionizzato ad alta densità che hanno una massa variabile da qualche centinaio a molte migliaia di volte quella solare. Le forze gravitazionali tendono a ridurre una nube di questo tipo in una configurazione più compatta. Alla contrazione si oppone però la pressione interna del gas nella nube, che tende a far espandere la nube stessa; di solito la pressione interna è molto più forte di quella gravitazionale e per la nube non c'è rischio di collasso. Può tuttavia accadere che un'improvvisa fluttuazione di pressione – per un evento violento come l'esplosione di una supernova, la formazione di una stella massiccia o un grande riassestamento del campo magnetico interstellare – possa comprimere una nube fino a densità molto superiori a quella normale. In queste condizioni, che si verificano raramente, la gravità può superare la pressione interna di modo che la nube comincia a collassare e forma la stella. Mentre la nube collassa, i suoi granuli interstellari ne schermano l'interno dal riscaldamento dovuto alla radiazione proveniente dalle stelle. La temperatura della nube diminuisce e la pressione interna diventa meno efficace. La nube in via di collasso si scinde in frammenti i quali, a loro volta, danno origine a frammenti più piccoli. Quando un singolo frammento avrà completato il suo collasso, assumerà la forma di disco appiattito, freddo ai bordi e caldissimo al centro; una nebulosa solare primordiale.

Qual era la natura della nebulosa solare e come è avvenuta la sua evoluzione? Quando si è formato il Sole? Perché vi sono i pianeti? Come presero forma? Modelli abbastanza diversi della struttura della nebulosa solare primordiale e della sua evoluzione derivano da valutazioni diverse delle sue dimensioni. Queste valutazioni sono state fatte basandosi sulle attuali masse planetarie e procedendo a ritroso nel tempo. Ripetiamo questo ragionamento.

Molto approssimativamente, si può dividere la materia che costituisce i pianeti in tre classi in funzione della sua volatilità: rocce, ghiacci, gas. I principali componenti dei materiali rocciosi sono ferro, ossidi, silicati di magnesio e di altri metalli, soprattutto alluminio e calcio. Tutti questi materiali si presenterebbero in forma solida alle pressioni caratteristiche della nebulosa solare primordiale e a temperature comprese tra 1000 e 1800 kelvin. I quattro pianeti più interni e la Luna (e almeno due dei satelliti principali di Giove) sono sostanzialmente rocciosi. I materiali rocciosi rappresentano circa lo 0,44 per cento della massa di materia da cui si è formato il Sole. La massa attuale di un pianeta roccioso rappresenta dunque lo 0,44 per cento della sua parte di nebulosa solare primordiale; la parte restante «manca» perché era troppo volatile per essere incorporata nel pianeta.

A una temperatura inferiore a 160 kelvin l'acqua della nebulosa si sarebbe trasformata in ghiaccio. L'ammoniaca e il metano sarebbero rimasti gassosi in quanto solidificano solo a temperature inferiori. I ghiacci costituiscono l'1,4 per cento della massa di materia da cui si è formato il Sole. Miscele di roccia e ghiacci spiegano la maggior parte della massa di Urano e Nettuno e parte della massa di Saturno e Giove (e la massa preponderante nella maggior parte dei satelliti dei pianeti esterni e delle comete). Procedendo con lo stesso tipo di ragionamento fatto per i pianeti interni, si può presumere che le rocce e i ghiacci presenti ora in tali corpi rappresentino l'1,4 più lo 0,44 per cento, ossia l'1,84 per cento della frazione della nebulosa originaria di questi corpi.

La nostra galassia cominciò a evolversi quando masse dense di gas si contrassero entro la protogalassia per formare una prima generazione di stelle (*a*). Col tempo il gas residuo, per l'azione congiunta della gravità e della forza centrifuga (*b*), assunse la forma di un disco sul piano di rotazione della Galassia. Successive generazioni di stelle (*in colore*) si formarono entro il disco (*c*); alcune stelle, evolvendosi rapidamente, produssero elementi pesanti mediante fusione nucleare e li espulsero nel disco, dove alcuni di essi condensarono formando granuli interstellari solidi. Le forti instabilità nei moti del gas e delle stelle hanno provocato degli aumenti di densità che hanno dato origine ai bracci a spirale della Galassia (*d*). L'area racchiusa entro il quadrato qui sopra è stata ingrandita nel primo disegno della pagina successiva.

A una temperatura simile a quella che doveva avere la nebulosa solare primordiale, gli elementi molto volatili – idrogeno e gas nobili come elio e neo – sarebbero rimasti allo stato gassoso. Questi gas sono rimasti legati a corpi facenti parte del sistema solare per gravità e, nel caso dell'idrogeno, sotto forma di composti chimici come l'acqua. (Una quantità esigua di elio proviene dal decadimento di elementi radioattivi.) Morris Podolak e l'autore hanno recentemente analizzato la struttura dei pianeti esterni. Abbiamo determinato che l'idrogeno e l'elio costituiscono circa il 15 per cento della massa di Urano, circa il 25 per cento di quella di Nettuno, circa due terzi di quella di Saturno e circa quattro quinti di quella di Giove. Si deve tener conto dei componenti gassosi di questi pianeti per stabilire la loro massa in rocce miste a ghiacci.

Dopo aver così stabilito le masse di roccia e di rocce miste a ghiacci dei pianeti esterni e dopo aver aumentato queste masse per tener conto dei costituenti mancanti perché troppo volatili per condensare, è possibile valutare la massa minima della nebulosa solare primordiale: una massa sufficiente a spiegare la formazione dei pianeti. Questa massa minima è circa il 3 per cento della massa solare. Valutazioni anteriori arrivavano a una massa molto inferiore – meno dell'uno per cento di quella solare – perché calcolavano che su Giove e Saturno vi fosse una quantità inferiore di rocce e ghiacci.

Il 3 per cento dei calcoli più recenti è sicuramente un minimo: si fonda infatti sull'ipotesi che i pianeti siano stati in grado di raccogliere dalla nebulosa solare tutta la materia che si trovava condensata in ciascuna orbita planetaria della nebulosa. Esistono però due tipi di solidi per i quali questo processo può essere stato del tutto privo di effetto. Consideriamo innanzi tutto i granelli di polvere interstellare aventi diametro di un micrometro (un millesimo di millimetro), che non furono vaporizzati quando collassò il frammento gas-nube. Lo spessore del disco della nebulosa deve essere stato di almeno un'unità astronomica (la distanza media tra la Terra e il Sole). Questa distanza è grandissima se confrontata con le dimensioni dei singoli pianeti che si consolidarono all'incirca sul piano centrale del disco. Effetti di resistenza aerodinamica dovuta al gas avrebbero impedito che grandi quantità di questi granuli si portassero, attraverso il gas della nebulosa, verso il piano centrale in quantità considerevoli; se molto gas fu invece dissipato verso l'interno per formare il Sole, i granuli avrebbero accompagnato il gas e non avrebbero mai potuto essere incorporati nei pianeti.

D'altra parte corpi più grandi (aventi un diametro di centimetri o metri), cadrebbero rapidamente attraverso il gas verso il piano centrale, ma potrebbero anche non finire sui pianeti. Come risultato di una differenza tra le forze centrifughe che agiscono sui corpi solidi e quelle che agiscono sul gas, i solidi si sposterebbero intorno all'asse centrale di rotazione della nebulosa più rapidamente del gas che li accompagna. Si muoverebbero perciò attraverso il gas con una velocità relativa di parecchie migliaia di chilometri all'ora; un vento di prua con questa velocità tenderebbe a rallentarli fino a far assumere ai solidi un moto a spirale piuttosto veloce attraverso il gas in direzione dell'asse centrale di rotazione. In questo modo essi si allontanerebbero definitivamente dalla regione di formazione dei pianeti. Queste argomentazioni depongono a favore di una massa della nebulosa solare primordiale maggiore del 3 per cento della massa solare.

L'evoluzione del sistema solare è avvenuta in un braccio a spirale a circa due terzi di distanza dal centro della Galassia. Nel braccio si muovono stelle, gas e granuli di polvere e nascono nuove stelle; stelle massicce con una breve vita delineano i bracci (*a*). Un'esplosione di supernova o la nascita di stelle massicce crea delle instabilità che provocano la concentrazione di nubi di gas ad alta densità (*b*). Le forze gravitazionali provocano la contrazione della nube, a cui si oppone la pressione interna della nube stessa (*c*). Se la nube possiede una massa sufficiente, la gravità domina (*d*) e la nube collassa. Il collasso genera forti vortici di gas (*frecce curve*) e frantuma la nube (*e*); ciascuno dei frammenti risultanti ha una rotazione ben precisa. Uno di questi ruota più velocemente e il suo gas si dispone su un disco che dà origine alla nebulosa solare primordiale (*f*).

Molte teorie sul sistema solare elaborate negli ultimi tre decenni presuppongono non solo l'esistenza di una massa minima della nebulosa solare, ma anche – punto debole ancor più grave – che il Sole stesso si sia formato direttamente durante il processo di collasso e che la nebulosa solare primordiale si sia disposta indipendentemente intorno al Sole. L'inconveniente è che semplici valutazioni del momento della quantità di moto che doveva essere contenuto nel frammento di nube collassante indicano che sarebbe stato impossibile per quasi tutti i frammenti semplicemente collassare per formare direttamente il Sole, lasciando una piccola frangia di nebulosa a costituire i pianeti. Secondo queste valutazioni la massa della nebulosa si sarebbe estesa piuttosto su parecchie decine di unità astronomiche. La nebulosa solare stessa doveva contenere sostanzialmente più di una massa solare – e probabilmente circa due masse solari – di materia, senza alcun Sole originariamente presente sull'asse centrale di rotazione. Cominciamo a spiegare la fonte di questo grande momento della quantità di moto e dimostreremo poi perché essa indica che non vi fu una nebulosa solare minima, ma piuttosto una massiccia.

Le forti fluttuazioni di pressione che hanno portato a una rapida compressione della nube interstellare originale e quindi alla soglia del collasso gravitazionale devono aver agitato violentemente i gas dalla nube. Moti turbolenti su vasta scala diedero origine a vortici su vortici di dimensioni assai varie e in diversi piani e direzioni. Quando un qualche frammento si trovava isolato da questa nube turbolenta, aveva una tendenza complessiva a ruotare dovuta ai moti dei vortici maggiori in essa contenuti. La massa del frammento, la sua velocità di rotazione e il suo raggio si combinarono per dare origine a un certo momento della quantità di moto che doveva conservarsi; il frammento, contraendosi, prese a girare più in fretta. Il Sole tuttavia ruota lentamente: nonostante la sua grande massa è responsabile di solo il 2 per cento del momento della quantità di moto del sistema solare. La maggior parte del momento della quantità di moto originale delle grandi masse di gas che contribuirono a formare il Sole deve esesre stato trasportato all'esterno; una parte considerevole della nebulosa originale deve perciò essere rimasta molto lontana dal Sole per assorbirlo.

Un'ulteriore ragione per postulare una nebulosa solare massiccia è il fatto che le stelle giovani, a quanto si può osservare, tendono, nei primi stadi della loro vita, a diminuire di massa in un brevissimo lasso di tempo; la perdita avviene mentre passano attraverso lo stadio solitamente detto di T Tauri che passiamo ora a esaminare un po' più dettagliatamente. La massa che rimase nella nebulosa solare senza mai entrare a far parte del Sole sommata alla massa che faceva una volta parte del Sole, ma che si perse durante il suo primo stadio di T Tauri potrebbe facilmente essere stata equivalente a una massa solare.

Come risultato di questo tipo di ragionamento – eseguito basandosi su ciò che si sa sui principi della formazione delle stelle piuttosto che procedendo in senso inverso a partire dalle masse degli attuali pianeti – Milton R. Pine e l'autore hanno costruito alcuni modelli numerici della nebulosa solare massiccia. I modelli coprivano una distanza radiale di circa 100 unità astronomiche e contenevano due masse solari di materia. In un modello tipico, la temperatura era di circa 3000 kelvin in prossimità dell'asse di rotazione e diminuiva fino a poche centinaia di kelvin nella regione di formazione dei pianeti. Queste temperature sono notevolmente più elevate di quelle che caratterizzarono il collasso della nube interstellare originaria; esse si sviluppano negli stadi successivi della compressione del gas, quando la densità diventa abbastanza alta da impedire alla radiazione di raffreddamento di sfuggire. La fuga di questa radiazione è ostacolata però solo durante i rapidi stadi finali del collasso; una volta che il gas ha finito di contrarsi – quando cioè si è formata la nebulosa solare primordiale – la radiazione può sfuggire relativamente in fretta, di modo che nella regione di formazione dei pianeti la nebulosa perderà la maggior parte della sua energia termica in solo poche centinaia o migliaia di anni.

Questo tempo di raffreddamento relativamente breve (breve paragonato al tempo richiesto per la formazione del Sole e dei pianeti) è difficilmente compatibile con il modello di nebulosa massiccia. La nebulosa raffreddandosi si appiattirà in un disco più sottile ed è stato dimostrato che i dischi sottili sono dinamicamente instabili; essi tendono a deformarsi assumendo l'aspetto di una sbarra. (Una deformazione di questo tipo può essere proprio quella che ha dato origine a coppie strette di stelle doppie, ma non si è verificata nel sistema solare.)

C'è un altro problema di scala dei tempi nel modello di nebulosa massiccia. Un processo importante per trasportare il momento della quantità di moto lontano dall'asse centrale di rotazione in modo che il gas si contragga verso tale asse è probabilmente un sistema di veloci correnti trasversali: correnti di gas che si muovono in un piano parallelo all'asse di rotazione e perpendicolarmente al piano centrale della nebulosa. Pine e io valutammo che, per il trasporto verso l'esterno del momento della quantità di moto perduto dalle parti interne della nebulosa primordiale, sarebbe sufficiente qualche migliaio di anni. John Stewart del Max Planck Institut für Physik und Astrophysik di Monaco di Baviera ha dimostrato che la turbolenza del gas deve avere un ruolo importante in una nebulosa solare primordiale e può essere la causa di un trasporto verso l'esterno ancora più rapido del momento della quantità di moto.

Sia il tempo di raffreddamento, sia il tempo necessario per il trasporto del momento della quantità di moto sembrano troppo brevi in confronto al tempo richiesto per l'accrezione della nebulosa solare. Dopo la separazione di un frammento della nube interstellare la zona centrale di essa sarà probabilmente più densa e collasserà più rapidamente del resto del frammento. Non appena la regione centrale avrà smesso di collassare, si formerà quindi per prima cosa una piccola nebulosa solare; questa aumenterà di volume per accrezione di ciò che resta del frammento che vi cadrà sopra in un periodo di tempo compreso probabilmente tra 10 000 e 100 000 anni, molto più lungo dei tempi di raffreddamento e di trasporto del momento della quantità di moto che abbiamo stimato.

Queste considerazioni mi hanno portato a un nuovo modello della nebulosa solare primordiale che cercherò di definire nei particolari. È necessario costruire non un singolo modello, ma tut-

ta una sequenza evolutiva di modelli cominciando da una piccola nebulosa solare che aumenta per accrezione durante un intervallo di tempo di circa 30 000 anni. In tal caso il tempo necessario alla ridistribuzione del momento della quantità di moto rimane breve in confronto al tempo di accrezione, in modo che gran parte della massa partecipa alla formazione del Sole non all'inizio del periodo di accrezione, ma durante tutta la sua durata; la massa della nebulosa esterna alla regione di formazione dei pianeti rimane una frazione relativamente piccola della massa solare durante tale periodo. Come per il raffreddamento, il gas in accrescimento è bruscamente rallentato quando urta la superficie della nebulosa solare; l'energia della sua caduta viene convertita in calore che è irradiato dalla superficie. Negli stadi successivi dell'accrezione tale processo mantiene gli strati esterni della regione di formazione dei pianeti probabilmente a una temperatura di poche centinaia di kelvin, mentre la temperatura dell'interno sarebbe un po' superiore. Contemporaneamente il continuo flusso di massa verso l'asse centrale di rotazione diminuisce le instabilità dinamiche entro la nebulosa.

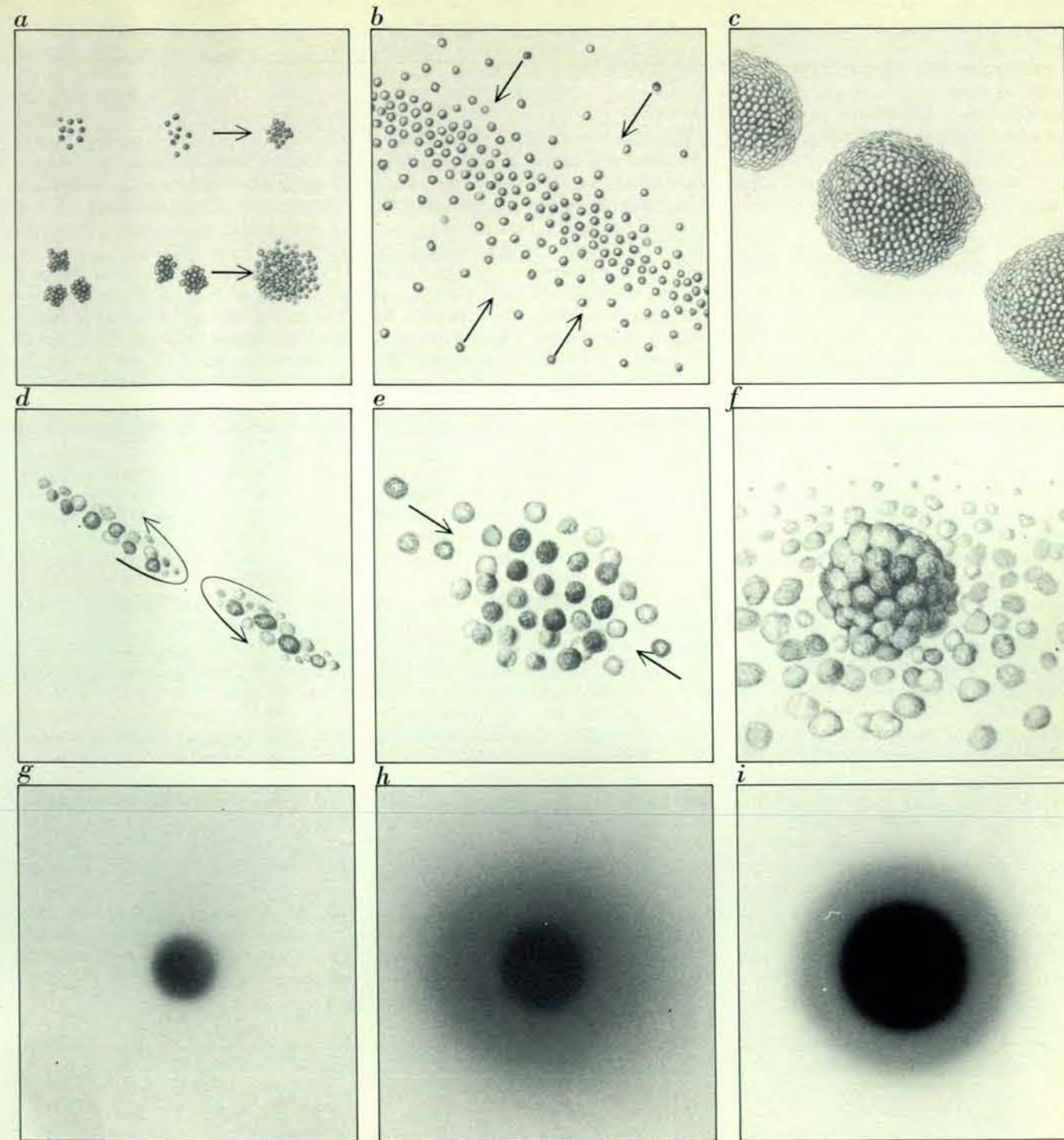
I due modelli di nebulosa solare primordiale, uno derivato dalle masse dei pianeti e l'altro dai principi della formazione stellare sembrano così convergere in un modello intermedio della nebulosa solare iniziale. In tale modello qualcosa più di una massa solare si è raccolta in direzione dell'asse di rotazione, ma non è ancora riconoscibile come Sole. Questa formazione è circondata da un disco di gas e polvere la cui massa può arrivare fino a un decimo di quella solare.

Il modello ad accrezione della nebulosa solare primordiale presuppone che una regione centrale del frammento di nube sia collassato più velocemente del resto (*a*). Esso formò una piccola nebulosa solare: una massa centrale che non era ancora il Sole, circondata da un disco di gas e granuli di polvere che alla periferia erano concentrati in maggiore quantità (*b*). La piccola nebulosa si estese per accrezione in un successivo lungo periodo di tempo (*c*).

I pianeti si formarono dall'accumulazione di granuli interstellari e, nel caso dei pianeti esterni, dalla successiva attrazione e coesione dei gas. La formazione di materia solida sarebbe iniziata, secondo i calcoli da me fatti recentemente, nella nube di gas in via di collasso. Vortici di gas turbolento avrebbero accelerato i granuli interstellari fino a far loro acquistare moti relativi tanto ampi da cominciare a collidere tra loro. Essendo formati da materiale stellare ed essendo stati espulsi poi nello spazio interstellare, dove sulla loro superficie condensarono ghiacci e altri componenti volatili, tali granuli avevano probabilmente una struttura piuttosto soffice. Non ci sarebbe da stupirsi se queste particelle si fossero ammassate tra di loro quando entrarono in collisione formando aggregati. Col trascorrere del tempo gli aggregati di granuli sarebbero entrati in collisione tra loro, dando origine o ad aggregati più grandi o a frammenti più piccoli. Al tempo della formazione della nebulosa solare è probabile che molti aggregati avessero raggiunto il diametro di millimetri o centimetri.

Aggregati di queste dimensioni si sarebbero spostati nel gas verso il piano centrale della nebulosa in decine o centinaia di anni. Siccome la velocità di questo moto dovrebbe variare con le dimensioni, collisioni ulteriori finirebbero con l'aumentare le dimensioni degli aggregati e accelerare la loro caduta verso il piano centrale. A questo punto però, a meno che non siano in grado di aumentare considerevolmente le loro dimensioni, gli aggregati si disperderebbero nella nebulosa solare interna trascinati dal gas, come già ricordato.

Un processo critico nella formazione dei pianeti può essere perciò un meccanismo proposto di recente da Peter Goldreich del California Institute of Technology e da William R. Ward della Harvard University, che darebbe origine a corpi di dimensioni maggiori. Essi dimostrarono che se c'è uno strato sottile di solidi condensati nel piano centrale della nebulosa, con una minima velocità relativa delle particelle, allora un potente meccanismo di instabilità gravitazionale separerà lo strato sottile in corpi aventi diametro dell'ordine di quello degli asteroidi o pianetini: chilometri o decine di chilometri. Il meccanismo di instabilità estende la sua azione su distanze maggiori, attraendo i corpi aventi le dimensioni dei pianetini, in ammassi di centinaia o migliaia di corpi tenuti insieme dall'attrazione gravitazionale. Tali ammassi non si solidificano a causa del grande momento della quantità di moto dei corpi che li costituiscono il quale li fa ruotare intorno a centri comuni. Tuttavia due ammassi, quando si avvicinano tra loro, si fondono; il campo gravitazionale fluttuante dell'ammasso così formato porta a un violento rilassamento dinamico dei moti dei corpi di modo che molti di essi si fondono per formare nuclei intorno a cui altri entrano in orbita (sebbene molti corpi vadano perduti). Gli ammassi interagiscono gravitazionalmente tra loro su distanze abbastanza grandi; mutue perturbazioni gradualmente aumentano le velocità relative degli ammassi, portando a ulteriori collisioni che producono corpi ancora più grandi.

Sembra che il meccanismo di instabilità di Goldreich-Ward sia un primo passo importante nell'accumulazione di corpi planetari. Gli stadi successivi del processo sono ancora altamente speculativi e furono sicuramente diversi nelle varie zone della nebulosa solare. I granuli interstellari, il cui raggruppamento iniziò il processo di accumulazione, sono quelli che hanno resistito senza trasformarsi in vapore al calore della nebulosa; i loro materiali, e perciò i materiali dei corpi più grandi in cui furono inglobati, sarebbero diversi secondo le distanze a cui si trovano

I pianeti cominciano a formarsi quando i granuli di polvere interstellare collidono e si aggregano tra loro formando ammassi più grandi (*a*). Questi cadono sul piano mediano della nebulosa (*b*) e vi formano un disco diffuso. Le instabilità gravitazionali raccolgono questo materiale in milioni di corpi delle dimensioni degli asteroidi (*c*) che danno origine ad ammassi gravitazionali (*d*). Quando gli ammassi collidono e si fondono (*e*), i loro campi gravitazionali diminuiscono ed essi coagulano in nuclei solidi attorno ai quali probabilmente orbitano dei corpi (*f*). Accrescimento e consolidamento continuati possono creare un corpo di dimensioni planetarie (*g*). Se il nucleo diventa più grande può concentrare per effetto gravitazionale parte del gas della nebulosa (*h*). Un nucleo abbastanza grande può provocare il collasso del gas fino a formare un guscio compatto (*i*).

lungo il ripido gradiente di temperatura: metalli, ossidi, silicati nella zona dove si sono formati i pianeti interni; composti rocciosi e ghiaccio d'acqua a distanza maggiore; roccia, acqua, metano e ammoniaca ghiacciati ancora più lontano.

Nel caso dei pianeti interni più piccoli i vari stadi che portano alle dimensioni finali possono passare attraverso diverse collisioni e successive aggregazioni di corpi rocciosi. Nel caso dei pianeti esterni vi sono altre considerazioni. Fausto Perri e io abbiamo recentemente preso in considerazione il comportamento della nebulosa solare primordiale quando in essa va crescendo un grande nucleo planetario. Al crescere della massa del nucleo, il gas della nebulosa solare viene concentrato gravitazionalmente verso il nucleo; con la crescita continua del nucleo la quantità di massa nel gas che è concentrato cresce ancora più rapidamente della

massa del nucleo stesso. A un certo punto il nucleo raggiunge una dimensione critica (che dipende dalle condizioni di temperatura del gas circostante) tale che il gas diventa idrodinamicamente instabile e collassa sul nucleo planetario.

I principali componenti delle atmosfere di Giove e Saturno sono idrogeno ed elio e riteniamo che questi pianeti abbiano acquistato la maggior parte della massa proprio attraverso i processi di concentrazione e collasso. Idrogeno ed elio sono responsabili di una piccola frazione della massa di Urano e Nettuno, fatto che dimostra che probabilmente i loro nuclei non raggiunsero mai le dimensioni critiche per un collasso idrodinamico; questi due pianeti crebbero tuttavia abbastanza per conservare gran parte dell'idrogeno e dell'elio che si erano concentrati per gravità in prossimità del loro nucleo. I pianeti interni, d'altra parte, erano probabilmente troppo piccoli per concentrare una parte considerevole del gas della nebulosa.

Quando avvenne il collasso che diede origine alla formazione di Giove e Saturno, la conservazione locale del momento della quantità di moto nel gas avrebbe dovuto avere l'effetto di appiattire questo gas in un disco disposto intorno al nucleo planetario. Col trascorrere del tempo i due pianeti «spazzarono» via tutto il gas vicino alla nebulosa. Si potrebbe pensare a essi come a modelli in miniatura della nebulosa solare primordiale: un nucleo centrale di rocce e ghiacci condensati al posto del Sole, con un disco gassoso intorno al nucleo simile alla nebulosa solare. Tutti e due questi grandi pianeti hanno sistemi di satelliti regolari di notevole massa, formati probabilmente da un disco gassoso mediante processi analoghi alla formazione dei pianeti della nebulosa solare.

Qualsiasi teoria sull'origine e l'evoluzione del sistema solare deve includere in qualche modo anche le comete, i suoi membri più spettacolari, ma anche meno compresi. Jan Oort dell'Osservatorio di Leida ha suggerito, qualche anno fa, che le comete «abitino» in un enorme distesa di spazio che ha per centro il Sole, inizia molto al di là dei pianeti esterni e si estende per una distanza di forse 100 000 unità astronomiche. La massa totale delle comete in questa vasta «nube di Oort» varia probabilmente tra 1 e 1000 masse terrestri il che può spiegare la presenza di un numero di comete tra 10^{12} e 10^{15}. Le comete che riusciamo a scorgere dalla Terra sono solo quelle poche che vengono perturbate da una stella di passaggio e spinte verso il centro del sistema solare.

Una cometa è una «palla di neve sporca», un aggregato di ghiaccio e roccia, nel modello suggerito per primo da Fred L. Whipple della Harvard University. Quando una cometa si avvicina al Sole, i suoi gas, accompagnati da particelle di polvere, si staccano da essa per formare le caratteristiche chioma e coda. L'analisi delle code mostra che, tra le molecole che si trovano sotto forma di vapore, vi è in prevalenza acqua, ma vi sono anche composti organici insoliti. La polvere, parte della quale viene a posarsi nell'alta atmosfera terrestre, consiste di soffici masse di materiale roccioso a grana fine. Una cometa è, in altre parole, un insieme di granuli interstellari.

Le comete devono o essersi formate entro la nebulosa solare e essere state scaraventate in qualche modo nella nube di Oort, oppure ancora essersi formate fuori, nella nube di Oort stessa. Oort suggerì originariamente che esse si fossero formate vicino a Giove, e fossero state perturbate dal campo gravitazionale di tale pianeta su orbite molto grandi che erano state arrotondate da perturbazioni stellari.

Ciò avrebbe richiesto la formazione di un'enorme massa di comete, dato che quelle espulse dal sistema solare sarebbero state molte di più di quelle rimaste nella nube di Oort. Inoltre, tenendo conto delle temperature che dovevano prevalere vicino a Giove, sembra improbabile che molecole più complesse dell'acqua potessero essersi solidificate. Molecole più complesse sono possibili nelle zone più esterne della nebulosa e perciò, secondo Whipple e altri, le comete si sarebbero formate vicino a Urano e Nettuno e sarebbero entrate a far parte della nube di Oort per azione del campo gravitazionale di questi pianeti.

Personalmente ritengo che le comete si siano formate nella nube di Oort stessa. È vero che il gas in via di collasso del frammento di nebulosa che divenne la nebulosa solare primordiale non fu mai abbastanza denso nelle zone così lontane dal centro da permettere ai granuli interstellari di aggregarsi in corpi piuttosto grandi. Esiste però un'altra possibilità: la maggior parte delle stelle della Galassia sono molto meno massicce del Sole e ciò suggerisce che la frammentazione della nube di gas può essere, a volte, continuata fino a dare origine a oggetti con massa pari a un decimo di quella solare.

a

b

c

Le comete possono essersi formate da piccoli frammenti di nube che inizialmente si muovevano intorno al frammento più grande il quale divenne la nebulosa solare (*a*). I frammenti piccoli cominciarono a orbitare su piani che sempre più si addensarono a formare dischi in cui si accumularono sia le comete, sia i pianeti (*b*). Poi la luce stellare potrebbe aver fatto evaporare i gas di queste «nebulose cometarie» lasciando viaggiare le comete su enormi orbite intorno al Sole (*c*). Di tanto in tanto un'orbita cometaria passando vicino a una stella subisce una perturbazione e l'orbita risultante si avvicina al Sole.

a

b

Il sistema solare fu ripulito dal «vento T Tauri». Quando il gas, nel suo moto di contrazione verso il centro della nebulosa, raggiunse una densità sufficiente, i nuclei degli atomi di idrogeno cominciarono a fondere e il Sole cominciò a brillare (*a*). In questa fase, il Sole perse grandi quantità di materia che originò un intenso vento solare che avrebbe asportato il gas restante (*b*).

La frammentazione può essere proseguita ulteriormente. I piccoli frammenti potrebbero essersi aggregati gravitazionalmente alla nebulosa solare primordiale in orbite che attraversano la nube di Oort. Tali frammenti formerebbero dischi piuttosto grandi e molto freddi, luoghi ideali per la formazione di comete. Quando i dischi vennero riscaldati dalla radiazione ultravioletta delle stelle esterne, i gas sarebbero evaporati lasciando le comete su orbite solari (*si veda la figura nella pagina a fronte*).

Dopo la formazione dei pianeti, molto gas della nebulosa solare sarebbe ancora rimasto in orbita intorno al Sole insieme a innumerevoli piccoli corpi e a grandi quantità di polvere non consolidata. Ora in orbita vi sono pianeti e asteroidi con assai poca polvere e quasi niente gas. Come fu «ripulito» il sistema solare? Come ho ricordato sopra, le stelle giovani passano, in modo caratteristico, attraverso lo stadio di T Tauri quando espellono materia a una velocità vertiginosa: fino a una massa solare per milione di anni. Ci sono tutte le ragioni per ritenere che anche il Sole attraversò una simile fase e il terribile vento originato da questa massa espulsa trasportò fuori nello spazio il gas residuo. Il primo vento solare avrebbe privato i pianeti interni dei resti di una qualsiasi atmosfera primitiva di idrogeno ed elio della nebulosa solare primordiale; i pianeti esterni si sarebbero formati abbastanza presto per poter catturare l'idrogeno e l'elio prima che cominciasse a soffiare il vento solare. Inoltre, qualora il gas fosse stato ancora in fase di accrezione da parte del frammento di nube originaria, tale processo sarebbe stato arrestato dal vento poiché i gas che ricadevano sarebbero stati ricacciati indietro nello spazio interstellare.

Cosa accadde quando iniziò il vento T Tauri? Perché non soffiò via la nebulosa solare primordiale molto prima che il Sole diventasse così grande? Le reazioni termonucleari dell'idrogeno si innescano solo in condizioni estreme di alta temperatura e densità. Perri e io abbiamo recentemente determinato che le temperature della nebulosa primordiale erano così basse che il calore di compressione del gas non avrebbe potuto innescare la fornace solare a una densità centrale paragonabile a quella attuale; la densità avrebbe dovuto essere almeno 100 volte maggiore di quella attuale. Solamente in questo caso il Sole si sarebbe potuto assestare nella configurazione attuale, si sarebbe innescata la fornace termonucleare e avrebbe potuto cominciare a soffiare il forte vento T Tauri. Un'enorme massa si deve essere riunita per raggiungere tale densità. In altre parole, data la temperatura originaria della nebulosa, il Sole doveva raggiungere una grande massa prima di poter divenire un vero e proprio «sole».

Dopo che il Sole ebbe cominciato a splendere e il vento T Tauri ebbe soffiato via il gas, iniziò lo stadio di «ripulitura» finale dello spazio interplanetario e il completamento della formazione dei pianeti. Le orbite della maggior parte dei corpi minori del sistema solare (diversi dai pianetini che si osservano nella loro fascia isolata) sarebbero state continuamente modificate dalle perturbazioni planetarie. In poche centinaia di milioni di anni la maggior parte di questi corpi o avrebbe subito collisioni con uno dei pianeti (le superfici di Mercurio, della Luna e di Marte mostrano ancora le cicatrici di questo bombardamento finale) o sarebbero stati espulsi dal sistema solare per opera di un pianeta maggiore.

Le piccole particelle di polvere furono soggette a forze ancora più intense delle perturbazioni gravitazionali: gli effetti della luce solare. I fotoni che le particelle assorbono dal Sole non possiedono momento della quantità di moto; tuttavia i fotoni che le particelle irradiano trasportano parte del momento della quantità di moto del moto orbitale delle particelle. La luce solare si comporta quindi come un mezzo che oppone resistenza alle particelle dotandole di un moto a spirale verso il Sole. I solidi più grandi, aventi fino a un chilometro di diametro, sono perturbati dalla luce solare in un modo diverso. Quando un corpo ruota, la temperatura di una parte della sua superficie aumenta finché essa è colpita dalla luce solare, mentre sulla parte opposta diminuisce. Un emisfero del corpo perciò emette più radiazioni dell'altro. Ciò dà origine a una spinta preferenziale che può perturbare l'orbita del corpo sia in direzione del Sole, sia in direzione opposta, a seconda della direzione di rotazione del corpo stesso. Tali corpi potranno poi avvicinarsi a uno dei pianeti dove saranno espulsi dal sistema solare. La luce solare riuscirebbe così a «spazzare» via molti dei detriti più piccoli lasciati dalla formazione del sistema solare.

Molti dettagli di questa storia evolutiva del sistema solare restano allo stadio di congettura finché nuovi dati non confermeranno le teorie attuali. Nel selezionare e combinare insieme fatti, idee e ipotesi necessariamente sono stato influenzato dalle mie opinioni personali. Altri avrebbero impostato il problema in modo diverso poiché non esiste ancora una teoria accettata da tutti.

Il Sole

Recenti osservazioni dallo spazio hanno rivelato nuove spettacolari strutture della superficie e dell'atmosfera solare; quanto accade all'interno del Sole, tuttavia, sta diventando ancora più misterioso

di E. N. Parker

La Terra è riscaldata dalla luce del Sole da 4,6 miliardi di anni, e ogni tipo di vita è sostenuto dall'energia solare, convertita in energia chimica dalle piante. Fin dagli inizi della storia, l'uomo ha riconosciuto la funzione vitale del Sole. Nel suo rispetto per il disco infuocato, egli lo ha considerato una divinità, oppure lo ha immaginato sotto la diretta protezione della divinità stessa.

Il Sole non è meno misterioso oggi. Possediamo una sorprendente quantità di dati, raccolti durante gli ultimi 30 anni di esplosione dello sviluppo tecnologico il quale ha dato origine a molti nuovi strumenti di osservazione. Questi dati dimostrano che il Sole ha una struttura complessa, finora rivelata solo parzialmente.

La storia della nostra conoscenza scientifica del Sole comincia nei secoli XVIII e XIX, quando si studiarono estesamente in laboratorio le proprietà dei gas. Da quella conoscenza, sintetizzata nella legge della proporzionalità della pressione del gas alla densità e alla temperatura, Jacob Robert Emden dedusse il primo rudimentale modello del Sole: una serie di gusci gassosi sferici e concentrici. I due principi fondamentali del modello erano che a ogni livello, internamente al Sole, la pressione fosse tale da bilanciare il peso del gas sovrastante e che il peso del gas fosse determinato dalla attrazione gravitazionale di tutta la massa del gas sottostante. Emden tuttavia non ebbe modo di determinare la temperatura del gas all'interno del Sole, e quindi non poté trarre una conclusione univoca riguardo alla sua massa e alla sua composizione chimica.

Sempre nel XIX secolo fu misurata la temperatura della superficie visibile del Sole, deducendola dalla sua intensità luminosa e dalla distribuzione di tale intensità nelle lunghezze d'onda comprese nello spettro visibile. Dalla densità media del Sole, dedotta dalla teoria gravitazionale, si concluse che il Sole era una sfera di idrogeno caldo. Tracce di elementi più pesanti, come carbonio, sodio, calcio e ferro, furono identificate con lo spettroscopio; l'elio invece è stato scoperto grazie alla sua riga spettrale prima di essere isolato e identificato in laboratorio da William Ramsay nel 1895.

Nello stesso periodo studi condotti sulle rocce terrestri indicarono che la vita sulla Terra risaliva a milioni di anni prima piuttosto che alle poche migliaia risultanti dall'interpretazione della Sacra Scrittura. Quindi il Sole doveva risplendere almeno da allora. L'enorme quantità di energia emessa dal Sole (10^{33} erg per secondo) non si poteva far derivare soltanto dalla combustione di materiale infiammabile: i combustibili chimici si sarebbero esauriti in poche migliaia di anni mentre, se il Sole si fosse contratto sotto la sua stessa forza di gravità al ritmo di 30 metri all'anno, riscaldandosi così grazie alla compressione dovuta al proprio campo gravitazionale, avrebbe avuto energia per circa 30 milioni di anni. I geologi e i paleontologi tuttavia richiesero subito per le loro teorie un periodo di tempo più lungo. Le loro ricerche dimostravano che la Terra, e la vita su di essa, datavano da almeno qualche centinaio di milioni di anni. All'inizio del XX secolo fu quindi evidente che il Sole doveva avere una fonte di energia interna molto più efficiente di quella chimica o gravitazionale. Occorrevano nuove leggi fisiche. A rendere il problema più complicato, si scoperse che la Terra aveva avuto una successione di profondi cambiamenti climatici, le età glaciali, per cui sorse il problema di un'eventuale variabilità dell'intensità della radiazione solare.

Da una maggior conoscenza sorsero nuovi problemi. Nel XIX e nel XX secolo si scoperse l'esistenza di una violenta attività sulla superficie del Sole. Esistono le macchie naturalmente, ma esistono anche i brillamenti solari, che sono associati alle macchie, identificati la prima volta nel 1859 dall'inglese Richard Carrington. Un singolo brillamento può durare anche 30 minuti ed emettere un millesimo di tutta l'energia emessa dal Sole da un'area di appena un decimillesimo della superficie totale del Sole. Occasionalmente un brillamento è così luminoso da essere visibile nonostante l'abbagliante disco solare (fu appunto uno di questi brillamenti che danneggiò la vista a Carrington) e, inoltre, sembrava che le spettacolari aurore e le « tempeste » del campo magnetico terrestre fossero associate ai brillamenti.

La corona solare, la tenue atmosfera esterna del Sole, è visibile durante le eclissi totali di Sole ed è nota da millenni. Acquistò una nuova dimensione nel 1933, quando si scoprì che la sua

La fotografia a colori falsati della pagina a fronte mostra degli archi attivi sul Sole, visti nell'estremo ultravioletto alla lunghezza d'onda di 1032 angström, con lo spettroeliografo per l'ultravioletto dello Harvard College Observatory, montato a bordo del satellite abitato *Skylab*. Gli archi, appartenenti alla corona interna, si estendono per 150 000 chilometri al di sopra del bordo occidentale del Sole. Le zone nere e blu rappresentano le regioni di provenienza della radiazione meno intensa, quelle gialle e magenta le più intense e quelle rosse il massimo di intensità. L'intensità della radiazione è funzione sia della temperatura del gas sia della sua densità. Gli archi sono visti nella luce emessa dall'ossigeno VI (ossigeno privato di 5 elettroni) a 300 000 kelvin. Le zone rosse sottili lungo il bordo del disco solare sono le regioni attive.

temperatura era di un milione di kelvin. Il fatto che il gas della corona avesse una temperatura così elevata era strabiliante e fu subito considerato assurdo. Come poteva il Sole, con una superficie a 5600 kelvin, riscaldare un gas fino a un milione di kelvin? Le osservazioni andavano contro il secondo principio della termodinamica, che afferma che il calore non può passare da un corpo freddo a uno caldo. Più tardi Hannes Alfvén e Ludwig F. Biermann, indipendentemente, trovarono che la corona è riscaldata dalla dissipazione dell'energia meccanica dei moti convettivi al di sotto della superficie visibile del Sole. La temperatura della corona non aveva nulla a che fare con il fluire del calore dalla superficie visibile e veniva a cadere quindi la limitazione termodinamica a tale temperatura.

Quindici anni fa si osservò inoltre che la corona era in continua espansione nello spazio circostante. Viene a crearsi in questo modo un « vento » di particelle cariche, con velocità che vanno da 300 a 600 chilometri al secondo. È questo vento solare il principale responsabile delle aurore e delle attività magnetiche sulla Terra.

Le conoscenze sull'attività solare sono aumentate negli ultimi anni con le osservazioni dallo spazio. Prima di tutto, l'ipotesi che le regioni attive sul Sole fossero sorgenti di raggi X fu confermata da osservazioni dirette, e la prima fotografia a raggi X del Sole fu ottenuta da Herbert Friedman e dai suoi colleghi al Naval Research Laboratory. Le più recenti fotografie a raggi X del Sole fatte da Giuseppe Vaiana e dal suo gruppo all'American Science and Engineering, Inc., mostrano centinaia di minuscoli punti luminosi distribuiti su tutta la superficie del Sole. I singoli punti si accendono e si spengono con una vita media di circa otto ore; alcuni di essi poi presentano brillamenti improvvisi prima di scomparire. Le recenti spettacolari osservazioni fatte dall'osservatorio orbitante abitato *Skylab* hanno rivelato il fatto sorprendente che eruzioni di questo tipo avvengono ogni poche ore, e sono quindi in numero molto maggiore dei brillamenti. Probabilmente sono queste frequenti eruzioni, visibili solo dall'esterno dell'atmosfera terrestre, la causa delle variazioni del vento solare e quindi del campo magnetico terrestre.

Sezione trasversale del Sole che mostra le strutture esterne osservabili assieme all'ipotetica struttura interna. L'energia è liberata dalle reazioni termonucleari con la catena protone-protone (*si veda l'illustrazione alle pagine 36 e 37*) nel nucleo del Sole, e progredisce molto gradatamente verso la fotosfera, che è la superficie visibile del Sole, trasportata per mezzo di processi radiativi, nei quali gli atomi assorbono, emettono e diffondono la radiazione. A circa l'80 per cento della distanza tra il nucleo e la superficie il gas diventa instabile e l'energia viene allora trasportata per mezzo della convezione. Dalla zona di convezione partono poi onde d'urto che trasportano l'energia nella cromosfera, attraverso la zona di transizione, e nella corona. I campi magnetici, che danno origine alle macchie e ad altre forme di attività, sono concatenati con tutta la struttura del Sole, dalla zona convettiva fino alla corona e oltre.

Come si può cercare di capire un oggetto così complicato come il Sole? Si può cominciare formulando la domanda che sta alla base di tutto il problema: indipendentemente dalla complessità delle eruzioni solari, qual è la natura fondamentale del Sole?

Con l'avvento della fisica atomica e della teoria elettromagnetica, nella prima parte di questo secolo, divenne possibile stimare l'opacità della materia solare, capire cioè quale sia la sua trasparenza al passaggio del calore e della radiazione elettromagnetica. Fu chiaro inoltre che la temperatura doveva aumentare verso l'interno con una rapidità sufficiente a giustificare il flusso osservato di calore verso l'esterno. A. S. Eddington, Karl Schwarzschild, Subrahmanyan Chandrasekhar e altri poterono così dimostrare che la temperatura al centro del Sole doveva essere di dieci milioni di kelvin e che la densità centrale doveva essere circa 100 volte quella dell'acqua. La materia è allo stato gassoso e non allo stato liquido o solido perché a dieci milioni di gradi gli atomi sono privi dei loro elettroni e non c'è posto per la chimica, ossia non esistono legami fra i vari atomi.

La natura della sorgente di energia del Sole rimase sconosciuta per le prime tre decadi di questo secolo. Nel 1896 Henry Becquerel aveva scoperto la radioattività e l'idea delle particelle subatomiche cominciò ad apparire nella letteratura scientifica. Einstein affermò l'equivalenza fra massa ed energia, con l'implicazione della loro intercambiabilità, invitando così fisici quali Eddington a cominciare a parlare della conversione diretta della massa in energia all'interno del Sole, sebbene attraverso processi ancora sconosciuti. Forse era possibile che gli elettroni e i protoni si annichilassero, data la tremenda pressione esistente nel nucleo del Sole. Le idee erano vaghe ma allettanti.

A poco a poco poi si comprese che il gas all'interno del Sole era costituito da elettroni liberi e da nuclei atomici (a eccezione di rari atomi di elementi più pesanti che riuscivano a conservare gli elettroni delle orbite più interne). I nuclei sono soprattutto di idrogeno

con una aggiunta di elio; carbonio, azoto, ossigeno ed elementi più pesanti costituiscono appena l'un per cento. Questi nuclei si scontrano in continuazione: dal momento che sono tutti carichi positivamente le loro collisioni sono generalmente attutite dalla mutua repulsione elettrostatica, ciononostante, occasionalmente, durante collisioni più violente, i nuclei possono in un certo senso avvertire la presenza l'uno dell'altro.

Nel 1919 Ernest Rutherford osservò la prima trasmutazione artificiale di un nucleo. Bombardando nuclei di azoto con nuclei di elio emessi da bismuto radioattivo, si accorse che improvvisamente un nucleo di elio era stato assorbito dall'azoto, con l'emissione di un singolo protone, creando così un nucleo di ossigeno. Rutherford, James Chadwick e altri cominciarono allora a esplorare le varietà, apparentemente senza fine, di trasformazioni nucleari ottenibili facendo scontrare con sufficiente violenza due nuclei. Nel 1932 Chadwick ottenne una prova diretta che all'interno del nucleo non ci sono solo protoni, ma anche neutroni. Infatti all'interno di un nucleo molto denso un elettrone e un protone possono fondersi a formare un neutrone. In questo modo, un elettrone e un protone non si annichilano l'un l'altro, come era ritenuto in precedenza, ma danno origine a una terza particella.

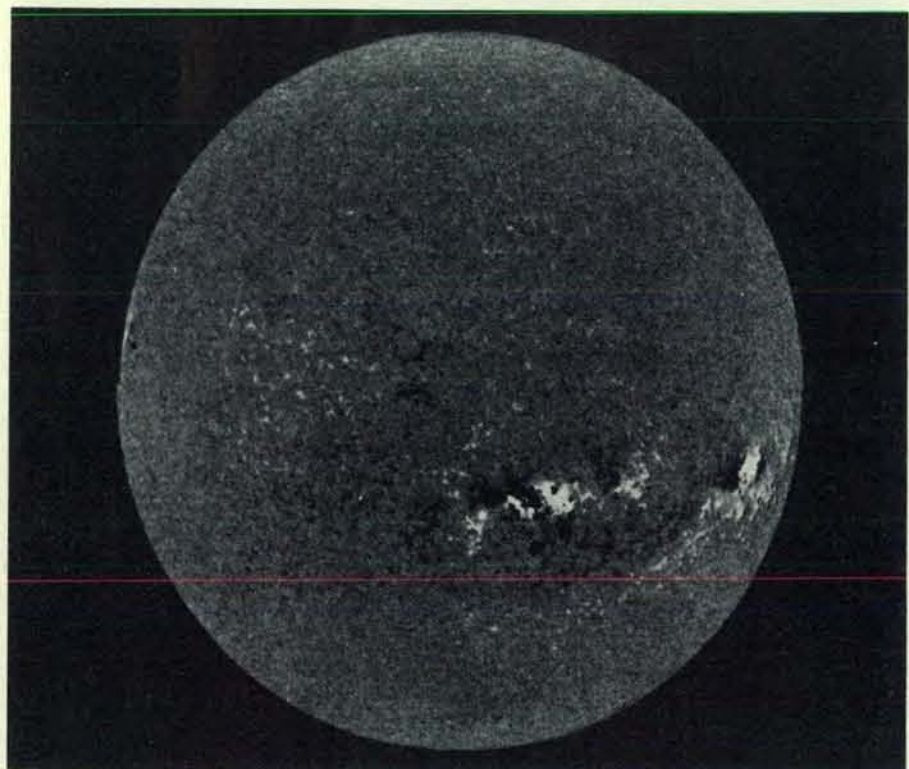
Con l'avvento delle macchine capaci di accelerare nuclei fino ad alte energie, divenne possibile portare avanti gli studi sulle reazioni nucleari in una grande varietà di situazioni. L'energia delle particelle accelerate può essere controllata con precisione e si può misurare quindi la probabilità della trasmutazione. Così si scoperse presto un effetto peculiare: quando un nucleo radioattivo decadeva, emettendo un elettrone (processo noto come decadimento beta), l'energia perduta dal nucleo non era portata via completamente dall'elettrone. A volte l'elettrone veniva espulso con tutta l'energia perduta dal nucleo, altre volte invece praticamente senza energia; normalmente possedeva un'energia intermedia. Mediamente l'elettrone possedeva solo la metà dell'energia perduta dal nucleo. L'altra metà era apparentemente svanita. Poteva questo significare che l'energia non si conservava, che le forze nucleari non ubbidivano ai principi che sembravano regolare tutti gli altri fenomeni?

Nel 1933 Wolfgang Pauli affermò che l'energia si conservava e che l'unica spiegazione razionale era che l'energia mancante fosse portata via da una particella non ancora scoperta. Dedusse che la particella doveva essere senza carica e senza massa a parte la sua energia (con massa di riposo cioè nulla) in modo tale che poteva sfuggire senza essere rivelata. Quest'ipotetica particella divene nota come neutrino.

Il passo fondamentale verso la comprensione della sorgente di energia del Sole fu compiuto nel 1939, quando H. A. Bethe scoprì che vi sono due cicli fondamentali di trasmutazioni nucleari attraverso i quali l'idrogeno può essere convertito in elio all'interno del nucleo del Sole. La trasmutazione di idrogeno in elio produce una perdita netta dello 0,7 per cento della massa del nucleo dell'idrogeno e la liberazione di una quantità corrispondente di energia. Il primo ciclo è quello del carbonio-azoto, durante il quale un nucleo di carbonio assorbe quattro protoni ed emette due positoni (antiparticelle dell'elettrone, cariche positivamente) diventando un nucleo di ossigeno instabile. L'ossigeno quindi si divide dando luogo a un nucleo di carbonio e a uno di elio. In questo modo si ottiene di nuovo il nucleo di carbonio originario e l'effetto totale è la conversione di quattro protoni in un nucleo di elio.

Il secondo ciclo è la cosiddetta catena protone-protone durante la quale due protoni collidono ed emettono un positone e un neutrino, formando un nucleo di deuterio, l'isotopo pesante dell'idrogeno, il cui nucleo possiede un protone e un neutrone. Al deuterio si aggiunge poi un altro protone, formando l'isotopo leggero dell'elio, l'elio 3. Infine due nuclei di elio 3 si combinano per dare origine a un nucleo di elio ordinario, l'elio 4 liberando anche due protoni. L'effetto totale è nuovamente la conversione di quattro protoni in un

La protuberanza eruttiva del 21 agosto 1973, che appare in questa immagine, si è estesa per più di 400 000 chilometri sopra la superficie del Sole. È stata fotografata nella luce dell'elio ionizzato una volta (elio II) con lo spettroeliografo per l'ultravioletto del Naval Research Laboratory a bordo dello *Skylab*, alla lunghezza d'onda di 304 angström. La Terra, in scala, sarebbe un po' più grande del punto che chiude questo periodo.

Fotografia di un gruppo di macchie sul Sole, fatta nella luce visibile con il telescopio McMath del Kitt Peak National Observatory in Arizona, il 4 luglio 1974, al minimo del ciclo solare. Due macchie del gruppo più grande sono unite da un sottile ponte luminoso.

Magnetogramma dello stesso gruppo di macchie della illustrazione in alto, fatto nello stesso momento, con il telescopio solare a vuoto sempre a Kitt Peak. Le zone bianche e nere sono regioni di attività magnetica; il bianco rappresenta la polarità positiva e il nero quella negativa. La zona scura nel gruppo centrale corrisponde al ponte luminoso. L'aspetto allungato del Sole è dovuto alla tecnica di ripresa del magnetogramma.

nucleo di elio. La quantità di energia liberata è all'incirca un milione di volte maggiore di quella coinvolta in reazioni chimiche, quali la combustione.

Sembrava quindi che il mistero del Sole fosse stato svelato. Le reazioni nucleari liberano tanta energia che il Sole ha una vita probabile di 10 miliardi di anni! Al momento attuale si trova circa a metà della sua vita. Quando l'idrogeno sarà esaurito nel suo nucleo, questo si contrarrà per altri cinque miliardi di anni, fino a quando la sua temperatura e la sua densità saranno tali da permettere la fusione di tre atomi di elio in uno di carbonio. Gli strati esterni del Sole si espanderanno fino all'orbita di Venere e il Sole diventerà una gigante rossa.

Gli studi approfonditi degli ultimi vent'anni hanno dimostrato che l'esistenza di gran parte delle stelle può essere compresa, in termini di liberazione di energia, grazie alla conversione di idrogeno in elio: il ciclo del carbonio-azoto è più importante nelle stelle più calde e di massa maggiore del Sole, mentre il ciclo protone-protone predomina nelle stelle di dimensioni paragonabili a quelle del Sole. A una più profonda conoscenza, tuttavia, si accompagnò un nuovo mistero. Ci si accorse presto infatti che la catena protone-protone poteva seguire diverse strade. Per esempio un nucleo di elio 3 può occasionalmente combinarsi con un nucleo di elio 4 piuttosto che con un altro di elio 3. Il risultato è l'isotopo leggero del berillio, il berillio 7, che a sua volta può interagire con un protone per formare un nucleo di boro 8. Il boro 8 poi decade, emettendo un positone e un neutrino, dando origine a un nucleo di berillio 8 ordinario, che si divide infine in due nuclei di elio 4.

Questa alternativa per la catena protone-protone non ha effetti significativi sulla quantità di energia liberata, in quanto il risultato finale è sempre la conversione di idrogeno in elio. La caratteristica fondamentale è che il decadimento del boro 8 comporta l'emissione di un neutrino. Il neutrino prodotto da questo particolare decadimento ha tanta energia che dovrebbe essere possibile rivelarlo anche sulla Terra. In particolare ha un'energia tale che, quando collide con un atomo di cloro 37, lo può trasmutare in un atomo di argo 37. La probabilità di questa trasmutazione è estremamente bassa, ma è stato calcolato che il numero dei neutrini emessi è talmente elevato da render possibile la loro rivelazione.

La costruzione di un rivelatore di neutrini è stata intrapresa da Raymond Davis jr., del Brookhaven National Laboratory. Rivelare i neutrini è particolarmente difficile, in quanto tutte le sostanze sono completamente trasparenti per essi: un neutrino può passare attraverso un muro di piombo dello spessore di 1000 anni luce senza essere fermato. Per questa stessa ragione i neutrini vengono irradiati direttamente dal nucleo del Sole dove viene generata l'energia solare. L'impresa di Davis era eroica, ma il risultato sarebbe stato praticamente l'unica prova diretta sui modi in cui il Sole genera la sua energia. Davis sistemò un serbatoio con 100 000 galloni (378 000 litri) di percloroetilene (C_2Cl_4), un solvente, nelle miniere di Homestake, nel South Dakota, alla profondità di 1600 metri (lontano quindi dalle reazioni nucleari prodotte dai raggi cosmici). L'argo, prodotto dalla trasmutazione del cloro causata dall'interazione con i neutrini, sarebbe stato rivelato grazie alla sua radioattività.

L'esperimento è stato portato avanti per parecchi anni, con continui miglioramenti. Davis ha dimostrato che c'è qualcosa di fondamentalmente sbagliato. Nel serbatoio non veniva prodotto argo, e quindi dal Sole non venivano emessi neutrini. Con l'esperimento di Davis infatti si è riusciti a rivelare non più del 10 per cento del numero di neutrini previsto.

Un buco coronale, cioè una vasta regione della corona con temperatura e densità inferiori alla norma, visto sul Sole il 1 giugno 1973. Nella fotografia, ottenuta con il telescopio a raggi X dell'American Science and Engineering, Inc., da bordo dello *Skylab*, la corona appare come una zona luminosa e indistinta. Il buco coronale è la vasta zona scura al centro del disco solare ed è lunga più di 750 000 chilometri. I punti bianchi isolati sono dei punti luminosi a raggi X, regioni di intensa emissione.

Che cosa possiamo quindi concludere? Da un lato, può essere stato commesso qualche sbaglio durante l'esperimento? D'altro lato, vi può essere qualche errore nella previsione del numero di neutrini emessi dal boro 8 nel Sole? Dal momento che la produzione di neutrini nel Sole è molto sensibile alla temperatura, vi è forse qualcosa che non va nel complicato calcolo del trasferimento del calore nell'interno del Sole? Oppure qualcosa è sbagliato nei principi fisici fondamentali che regolano l'emissione di neutrini e la produzione di argo dal cloro?

Vi sono molte spiegazioni possibili: forse la luminosità del Sole aumenta e diminuisce in periodi dell'ordine di milioni di anni, e a questo proposito possiamo ricordare le età glaciali. Al momento attuale il nucleo del Sole starebbe espandendosi e produrrebbe quindi una piccola quantità di energia e quindi pochi neutrini. Se questo è il motivo giusto, esso deve però venir giustificato dai principi fondamentali dell'astronomia e della fisica. Oppure gli strati interni del Sole, a differenza di quelli superficiali, non contengono elementi pesanti, rendendo così più trasparente il gas e abbassando di conseguenza la temperatura prevista dell'interno. In tal caso, con una temperatura ridotta, l'elio 3 non si combinerebbe con l'elio 4 per produrre il boro 8 che, decadendo, emette i neutrini. Ogni nucleo di elio 3 invece si combinerebbe solo con un altro elio 3, producendo elio 4 e due protoni.

Si sta ora aumentando la sensibilità del sistema di Davis per poter rivelare i neutrini di bassa energia emessi durante il primo passo della catena protone-protone, quando due protoni collidono per combinarsi a formare un nucleo di deuterio con l'emissione di un positone e di un neutrino di energia inferiore a quella del neutrino emesso nel decadimento del boro. I neutrini di bassa energia non sono così efficaci nella produzione di argo dal cloro, in cambio però sono prodotti in grande quantità. La produzione di deuterio dai protoni è il passo fondamentale nella generazione dell'energia solare. Se non si trovano neanche questi neutrini, allora significa che la catena protone-protone non è attiva, oppure che le nostre ipotesi sulla generazione di energia da parte del Sole sono sbagliate.

Queste difficoltà non devono indurci a rigettare l'ipotesi che l'energia solare sia prodotta dalla conversione dell'idrogeno in elio. D'altra parte però eventuali discrepanze non devono essere sottovalutate. Anche se i notevoli sforzi di un gruppo di scienziati capaci non sono riusciti a superare le difficoltà, l'importante è che il problema sia stato compreso in tutta la sua importanza.

Come il Sole generi la sua energia è probabilmente la questione fondamentale che ci si pone, e se si riesce a superare l'attuale imbarazzo, la risposta ci verrà in termini di reazioni nucleari e di altri effetti fisici che si possono riprodurre direttamente in laboratorio. L'attività violenta sul Sole presenta invece un problema diverso. Questa attività sembra essere il risultato del moto del gas nel campo magnetico, e sebbene le proprietà fondamentali e le principali equazioni matematiche riguardanti il moto del gas e il campo magnetico siano ben note da esperimenti condotti in laboratorio, l'attività del Sole può svilupparsi solo su dimensioni dell'ordine di migliaia di chilometri o più, e gli effetti osservati non possono ovviamente essere riprodotti.

Lo studio dell'attività solare costituisce quindi uno sforzo particolarmente interessante. L'osservatore tenta di vedere quello che succede sul Sole, e il teorico poi cerca di spiegare le osservazioni, conciliandole con i principi fisici fondamentali. Le osservazioni sono fatte con telescopi da Terra, da palloni a grandi altezze e dallo spazio. Negli ultimi trent'anni i telescopi ottici terrestri sono stati perfezionati e ora si

La catena protone-protone è il ciclo di reazioni nucleari per la fusione dell'idrogeno in elio che è considerato la principale sorgente di energia nel Sole. Nel 99,75 per cento delle reazioni due protoni si combinano per formare un nucleo di deuterio, o idrogeno pesante, che emette un positone e un neutrino (*1*). Talvolta due protoni e un elettrone si combinano e producono un nucleo di deuterio e un neutrino. Il nucleo di deuterio prodotto da entrambi i processi si combina poi con un protone per dare un nucleo di elio 3 e un fotone (*2*). Nell'86 per cento delle volte l'elio 3 si combina con un altro elio 3, producendo un nucleo di elio 4 ordinario, e liberando due protoni (*3*). Come alternativa alla catena protone-protone il nucleo di elio 3 si combina con un nucleo di elio 4 per dare un nucleo di berillio 7 e un fotone (*4*). Quasi sempre poi il nucleo di berillio 7 assorbe un elettrone e si trasmuta in un nucleo di litio 7 emettendo un neutrino (*5*). Il litio 7 quindi si combina con un protone e si rompe in due nuclei di elio 4 (*6*). Più raramente il berillio 7 assorbe un protone e diventa un nucleo di boro 8 emettendo un fotone (*7*). Il nucleo di boro 8 quindi decade in un nucleo di berillio 8, in un positone e in un neutrino il quale dovrebbe essere rivelabile da Terra (*8*). Il nucleo di berillio 8 alla fine del ciclo si divide in due nuclei di elio 4 (*9*).

dispone di sofisticati ed efficienti strumenti per fotografare le complesse configurazioni magnetiche e gassose sulla superficie del Sole. Un gran numero di radiotelescopi segue e registra gli impulsi (*burst*) prodotti dagli elettroni veloci lanciati nello spazio dai brillamenti. I telescopi montati sui satelliti hanno osservato il Sole nella regione ultravioletta e X dello spettro, dove l'attività solare è più spettacolare.

Il campo magnetico, dentro e attorno al Sole, produce effetti che non si sarebbero potuti prevedere sulla base degli esperimenti di laboratorio. I gas caldi ed elettricamente carichi del Sole hanno un'ottima conduttività. Al centro del Sole il gas è così caldo che conduce la corrente elettrica alla pari del rame a temperatura ambiente; altrove il gas conduce meno bene, ma le dimensioni del Sole sono talmente grandi che tutta la massa nel suo insieme ha un'enorme capacità di conduzione. Come risultato, i campi magnetici nel Sole sono intrappolati nel gas e vengono trasportati e attorcigliati dai moti del gas nelle zone convettive subito sotto la superficie visibile del Sole. L'intensità del campo magnetico nelle vicinanze delle macchie è normalmente di 3000 gauss (6000 volte l'intensità del campo terrestre) lungo una superficie che può estendersi fino a 50 000 chilometri. Campi di questa intensità possono essere generati da elettromagneti in laboratorio, ma sono ugualmente impressionanti. In un campo magnetico di 3000 gauss, un cacciavite o un paio di pinze sarebbero strappati di mano e andrebbero a sbattere contro il polo più vicino del magnete.

Ci sono molte altre strutture magnetiche strane sul Sole. Esse vanno dalle interessanti strutture a filigrana, ai limiti dell'osservabilità, con un diametro di solo poche centinaia di chilometri, alle spicole e ai punti luminosi nella regione X dello spettro e alle protuberanze eruttive che talvolta si innalzano fino a migliaia di chilometri sulla superficie del Sole. Gli strati superiori dell'atmosfera solare, al di sopra della superficie visibile, sono enormemente influenzati dall'attività magnetica. La cromosfera (il tenue e irregolare strato subito al di sopra della superficie visibile) e la corona sono enormemente ingigantite sopra le regioni attive della superficie. Una delle più interessanti scoperte fatte con gli strumenti a bordo dello *Skylab* è l'esistenza di buchi nella corona sopra i poli del Sole e sopra altre regioni prive di attività visibile. Sembra, paradossalmente, che i buchi coronali siano le sorgenti delle particelle ionizzate ad alta velocità del vento solare. Era noto, ma forse non tenuto nella giusta considerazione o perfettamente compreso prima della spedizione dello *Skylab*, che l'attività magnetica sulla Terra talvolta diminuiva quando si era proprio di fronte a una regione attiva sul Sole. Gli effetti erano mascherati dal fatto che i brillamenti associati con le regioni attive inducevano talvolta una forte attività sulla Terra. In assenza di intensi brillamenti, gli effetti magnetici e l'aspetto delle aurore sono talvolta meno vistosi quando una regione attiva sul Sole ci sta di fronte.

I campi magnetici sul Sole mostrano la curiosa tendenza a raggrupparsi in tubi isolati, che spesso poi interagiscono con violenza quando si toccano. Il loro comportamento non è ancora pienamente compreso, nonostante siano apparse nella letteratura scientifica un notevole numero di « spiegazioni » accettabili. Io limiterò la mia esposizione al comportamento di una macchia di dimensioni cospicue, che è sufficiente a dare un'idea degli urgenti e imbarazzanti problemi che ci stanno davanti.

Una macchia è una zona estesa e leggermente depressa la cui superficie si trova a qualche centinaio di chilometri al di sotto della superficie visibile del Sole. L'ombra, la base centrale della depressione, appare nera nella fotografia perché la sua intensità luminosa è meno di un quarto di quella della superficie adiacente. La temperatura superficiale dell'ombra è di solo 3900 kelvin paragonata con i normali 5600 kelvin del resto della superficie. L'ombra è una zona superficiale fredda e rarefatta, ed è evidentemente la pressione delle zone circostanti che comprime e tiene confinato l'intenso campo magnetico associato alla macchia. È generalmente accettato che questo intenso campo magnetico sia responsabile della riduzione della temperatura dell'ombra, anche se tale connessione non è stata dimostrata in pieno.

L'ombra è circondata dalla penombra, una zona grigia e striata, che va in leggera pendenza, dall'ombra fino alla superficie circostante la macchia. Il campo magnetico della macchia emerge dall'ombra e si diffonde attorno attraverso la penombra. Oltre la penombra il campo magnetico rientra nel Sole, spesso in macchie vicine di polarità magnetica opposta. In certi casi, subito al di fuori della macchia, si trova una regione, nota come fossato, priva di campo magnetico. Evidentemente il campo magnetico si curva ad arco sopra il fossato prima di rientrare nel Sole a una certa distanza dalla macchia.

Dieci anni or sono Jacques M. Beckers, del Sacramento Peak Observatory, ed E. H. Schröter, che si trova attualmente all'Università di Gottinga, scoprirono minuscoli fasci di campi magnetici che si muovevano dentro e fuori dal bordo della macchia, partecipando apparentemente alla crescita e al decadimento della macchia stessa. Le macchie spesso appaiono in gruppi, con una struttura complessa di macchie singole, con polarità magnetica opposta, mescolate in complicate configurazioni. È in questi gruppi di macchie, complessi e variabili, che è probabile vedere dei brillamenti solari. Probabilmente i brillamenti sono la conseguenza dell'interazione di campi magnetici di polarità opposta che si annichilano a vicenda. Un grosso brillamento può liberare 10^{32} erg, equivalenti alla quantità di energia che potrebbe essere liberata dall'annichilazione di un campo magnetico di 1000 gauss che si estendesse in un volume le cui dimensioni lineari fossero dell'ordine di 15 000 chilometri. Le macchie più grandi hanno un campo di circa 4000 gauss e un diametro che può raggiungere i 50 000 chilometri. I brillamenti più intensi hanno filamenti che si estendono per 100 000 chilometri attraverso il disco solare. Recenti osservazioni fatte in raggi X mostrano che in ogni brillamento c'è una regione centrale più calda, probabilmente la scena degli avvenimenti principali, molto più concentrata dei filamenti luminosi e che occupa una superficie avente un diametro inferiore ai 10 000 chilometri.

Le macchie si possono osservare in gruppi dipolari, con il campo magnetico che emerge dalla macchia più a est per rientrare nella macchia più a ovest (o viceversa). I gruppi dipolari nell'emisfero nord del Sole si comportano, a questo proposito, in maniera opposta a quelli dell'emisfero sud, ed entrambi invertono le loro polarità a metà del ciclo di attività solare (11 anni). L'esistenza di gruppi dipolari indica che vi sono intensi campi magnetici al di sotto della superficie del Sole, di polarità opposta nei due emisferi.

Le singole macchie di un gruppo hanno normalmente una vita di solo poche settimane. Le prime macchie di un nuovo ciclo solare appaiono in una vasta striscia centrata a una latitudine di 40 gradi, sia nell'emisfero nord sia in quello sud. Con l'avanzare del ciclo le due regioni di formazione delle macchie si spostano progressivamente verso l'equatore, dove arrivano tra i 10 e i 14 anni più tardi. Esse poi scompaiono quando le nuove macchie del prossimo ciclo cominciano a formarsi alle medie latitudini. Il ciclo poi si ripete con la polarità delle macchie invertita.

La Terra si muove attorno al Sole in un'orbita inclinata di un angolo di circa 7 gradi sul piano equatoriale del Sole, in modo tale che le macchie e i brillamenti si trovano in direzione radiale rispetto alla Terra solo negli ultimi anni del ciclo. Sfortunatamente per i fisici che studiano l'attività solare il momento di maggior attività si ha quando le macchie si trovano tra i 15 e i 20 gradi dall'equatore. L'intenso vento solare prodotto dai numerosi brillamenti alla latitudine di 20 gradi può essere rivelato per il modo in cui esso influenza i segnali radio cha passano attraverso di esso, provenendo da lontane radiosorgenti celesti.

Al contrario, il vento solare proveniente dai poli del Sole è relativamente costante e molto veloce: circa il 50 per cento più veloce di quello nel piano equatoriale solare. Il motivo della maggior velocità consiste evidentemente nel fatto che le regioni polari del Sole sono dei buchi coronali. Informazioni di prima mano sull'intensità del vento solare dai poli possono tuttavia essere ottenute solo inviando un veicolo spaziale fuori dal piano dell'orbita della Terra. Un simile risultato può essere ottenuto lanciando un veicolo spaziale su un'orbita verso Giove, lasciando poi che siano la velocità e la forza gravitazionale del pianeta, combinate, a far girare il veicolo attorno e sopra le regioni polari del Sole.

Le macchie solari si sono comportate stranamente nei secoli passati. Esse sono state scoperte nel mondo occidentale nel 1611 da Johannes Fabricius e da Galileo, grazie all'invenzione del telescopio. (Gli osservatori cinesi, a occhio nudo, avevano osservato e annotato l'esistenza delle macchie almeno 1000 anni prima.) Il ciclo di 11 anni

tuttavia non è stato scoperto fino al XVIII secolo, ed è stato confermato solo nel 1843 da Heinrich Schwabe. Questa scoperta, stranamente tarda, di un fenomeno che sembra così ovvio, può essere compresa, almeno in parte, grazie al comportamento del Sole stesso.

Nel 1895 e nuovamente nel 1922 E. W. Maunder pubblicò degli articoli richiamando l'attenzione sullo strano comportamento del Sole nel XVII secolo. Le antiche registrazioni delle macchie indicano che si sono avuti due massimi del ciclo solare nei 30 anni successivi alla scoperta delle macchie, fatta nel 1611. I due massimi distavano di soli 15 anni. Le registrazioni poi mostrano come la quantità delle macchie, e l'attività solare a esse associata, siano diminuite a un livello piuttosto basso attorno al 1645 rimanendo poi completamente assenti fino al 1715. Dopo questa data, il ciclo solare è apparso come è conosciuto oggi e continua così da allora. Il significato di questa prolungata assenza delle macchie solari non avrebbe potuto essere compreso a quel tempo, in quanto c'erano stati 34 anni con macchie e 70 anni senza. Chi poteva dire quale era la regola? I 260 anni di attività delle macchie dal 1715 fanno pensare che il ciclo di 11 anni sia la norma. Possiamo solo aspettare per vedere che cosa ci riservano i prossimi secoli.

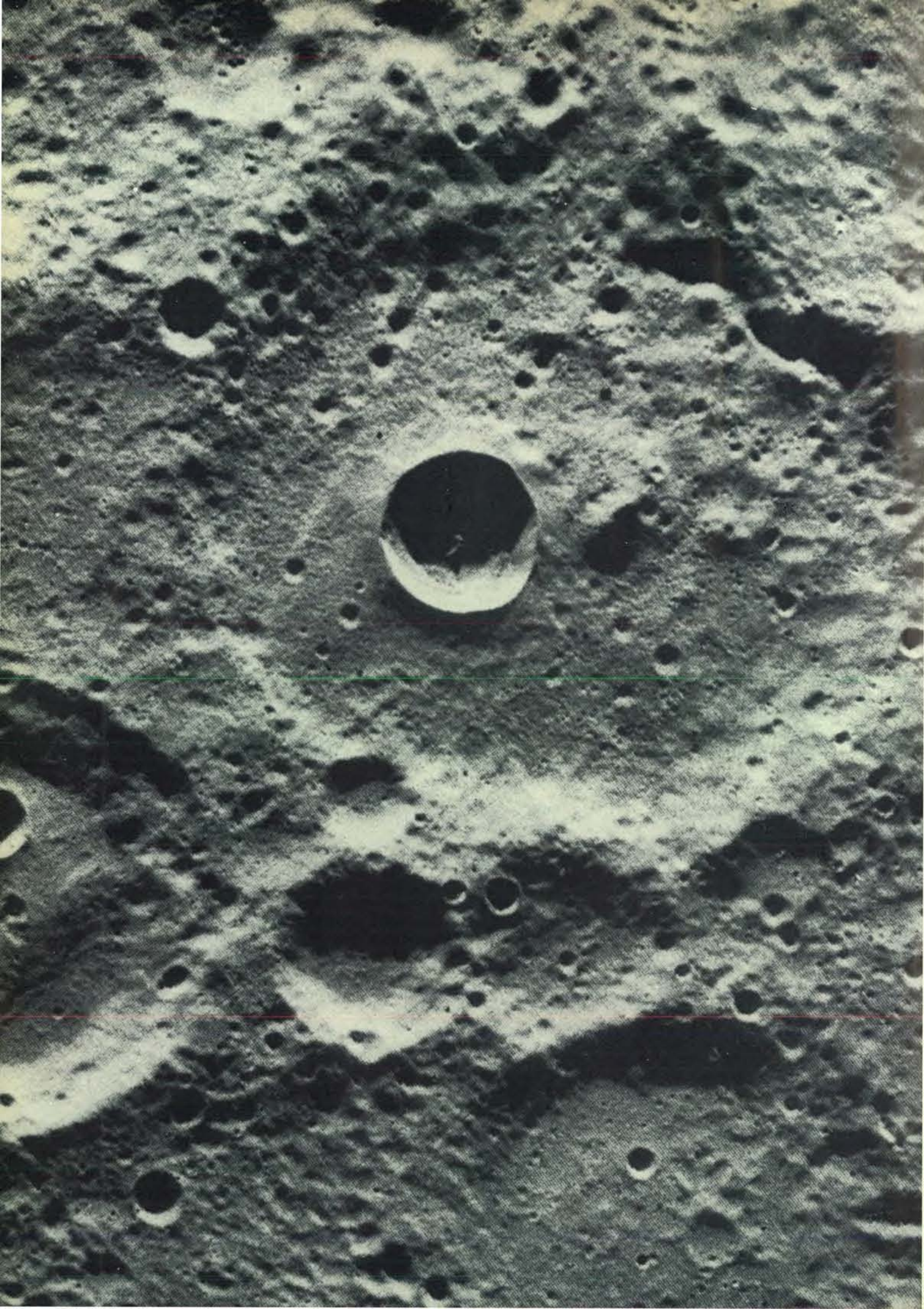
Durante i 70 anni di inattività gli osservatori dovettero spesso aspettare anni prima di poter vedere una singola macchia, mentre ora perfino al minimo del ciclo si può osservare almeno qualche macchia. L'importanza dell'assenza delle macchie non sta nelle macchie stesse, ma nell'assenza dell'attività solare a esse associata. La corona solare, che in gran parte è riscaldata dall'energia meccanica dell'agitazione creata dalle regioni attive, durante i 70 anni di inattività non è stata vista durante le eclissi. Sembra che tutta la corona sia stata un gigantesco buco coronale.

Le tempeste magnetiche e le aurore, comuni nelle isole britanniche e nei paesi scandinavi, praticamente scomparvero durante quei 70 anni, così che nel 1715, quando l'attività solare ricominciò, le aurore causarono meraviglia e costernazione in città come Copenaghen e Stoccolma. L'effetto più curioso e importante però fu scoperto da A. E. Douglass durante il suo lavoro pionieristico sulla datazione degli alberi attraverso i loro anelli di accrescimento, che fu pubblicato per la prima volta attorno al 1920. Douglass notò un generale andamento ciclico nella crescita annuale degli alberi: c'era la tendenza, per la crescita annuale, di aumentare e di diminuire circa ogni 10 anni. Con il progredire del suo lavoro, quando prese in esame campioni di legno di parecchi secoli, notò che la seconda metà del XVII secolo spiccava per l'assenza della variazione ciclica. Gli anelli mostravano piccole variazioni in larghezza e queste variazioni non possedevano alcuna struttura particolare, così che era difficile associare gli anelli annuali di un albero con quelli di un altro, e stabilire quindi una sicura sequenza di date per gli anelli. Douglass non riuscì a spiegare questo fenomeno, se non attribuendolo a condizioni ambientali, che sarebbero state più uniformi in quel periodo, rendendo così più regolare la crescita degli alberi.

Nel 1922 perciò Douglass lesse con notevole interesse l'articolo di Maunder sul « Journal of the British Astronomical Association » che riportava l'assenza del ciclo di attività solare, proprio nel periodo in cui esistevano delle difficoltà per la datazione degli alberi per mezzo degli anelli di accrescimento. Douglass scrisse a Maunder che riferì poi tali effetti sugli anelli degli alberi alla British Astronomical Association.

Le variazioni del clima terrestre e della crescita delle piante con l'attività solare sono un mistero non ancora risolto nel mezzo secolo passato dopo l'osservazione di Douglass. Fortunatamente per coloro che sono interessati all'argomento vi è ora una rinnovata curiosità attorno a una possibile connessione tra l'attività solare e l'ambiente terrestre. Il problema è al centro di accese controversie, ma è troppo importante per essere ignorato. La crescita delle piante in definitiva sta alla base di tutta la vita sulla Terra.

Tutto sommato quindi il Sole ha dimostrato di essere la fonte di più misteri di quanti potessimo desiderarne. Siamo andati abbastanza avanti nella sua comprensione, ma abbiamo ancora molta strada da percorrere. Nello stesso momento in cui tentiamo di risolvere i misteri presenti, siamo sicuri di scoprirne altri. In realtà, sarebbe un peccato se fosse diversamente. Gli enigmi che il Sole ci pone sono per noi delle pietre miliari verso nuovi orizzonti.

Particolare dell'apparecchiatura costruita da Raymond Davis jr. del Brookhaven National Laboratory nel tentativo di rivelare i neutrini previsti del decadimento del boro 8 nella catena protone-protone. Il rilevatore consiste in un serbatoio contenente 378 000 litri di percloroetilene (C_2Cl_4), un solvente, sepolto sotto 1600 metri di roccia, nelle miniere di Homestake, vicino a Lead, South Dakota. Il solvente è costituito per l'85 per cento da cloro 37. Quando un neutrino è assorbito da un nucleo di cloro 37 si forma un nucleo dell'isotopo radioattivo dell'argo, l'argo 37. Nel serbatoio, ogni due o tre mesi, viene fatto gorgogliare dell'elio per asportare tutto l'argo 37, che viene poi rivelato grazie al suo decadimento radioattivo. A partire dal 1968, data di inizio dell'esperimento, è stato rivelato meno del 3 per cento dell'argo 37 previsto. Ciò significherebbe che nell'interno del Sole vengono prodotti molti meno neutrini di quanti ne siano previsti.

Mercurio

Le straordinarie immagini riprese dalla sonda spaziale Mariner 10 *hanno rivelato un paradosso planetario: all'interno Mercurio è simile alla Terra, mentre in superficie è simile alla Luna*

di Bruce C. Murray

Si racconta che Copernico in punto di morte si rammaricava di non aver mai visto il pianeta Mercurio. L'aneddoto non sembra verosimile poiché nell'Europa settentrionale il pianeta è occasionalmente visibile al crepuscolo. Tuttavia, anche se Copernico avesse potuto vedere Mercurio attraverso un moderno telescopio, gli si sarebbe presentata un'immagine singolarmente insoddisfacente in cui si possono distinguere solo alcune vaghe macchie. Esse sono così deboli che gli astronomi sono stati per lungo tempo indotti nell'errore di attribuire al pianeta una velocità di rotazione inesatta.

Nel marzo del 1974, 501 anni dopo la nascita del fondatore della moderna astronomia, la sonda spaziale *Mariner 10* è passata ad alcune centinaia di chilometri da Mercurio, fornendo non solo delle fotografie grazie alle quali la risoluzione delle caratteristiche superficiali del pianeta viene migliorata di 5000 volte, ma anche delle misure completamente nuove dei fenomeni presenti nei dintorni immediati del pianeta. Improvvisamente Mercurio è stato strappato dall'oscurità e lo si è potuto osservare in un modo paragonabile a quello con cui si osservava la Luna prima della moderna era delle esplorazioni spaziali. Per di più, la sonda *Mariner 10* si trova in un'orbita che la riporta nelle vicinanze di Mercurio ogni 176 giorni. Di conseguenza, la sonda spaziale ha trasmesso un secondo gruppo di fotografie riprese a distanza ravvicinata il 21 settembre 1974, 176 giorni dopo il suo primo incontro col pianeta, e un terzo gruppo di osservazioni estremamente preziose, comprendenti alcune immagini ad alta risoluzione, il 16 marzo 1975, poco prima che la riserva di gas necessaria per stabilizzare la posizione della sonda nello spazio si esaurisse.

Prima del riuscito viaggio di *Mariner 10*, si sapeva che Mercurio è coperto da almeno un sottile strato scuro di silicati finemente frammentati molto simile a quello presente sulla Luna. Tenendo conto della differente distanza dal Sole, Mercurio imita molto bene la Luna nel modo di riflettere la luce solare e gli impulsi radar così come nella emissione di radiazione infrarossa e di onde radio. Tuttavia, si sapeva, sulla base della grandezza e della massa di Mercurio, che il pianeta ha una densità molto superiore a quella della Luna o di Marte e solo di poco inferiore a quella della Terra. La densità totale della Terra è più grande della densità, misurata in laboratorio, dei materiali che la costituiscono, poiché buona parte dei materiali è sottoposta ad alte pressioni nell'interno della Terra. Quindi, il fatto che Mercurio, nonostante sia molto più piccolo, abbia un'alta densità totale implica che esso contiene una quantità di elementi pesanti, particolarmente ferro, anche superiore a quella contenuta dalla Terra.

Persino le due conoscenze più elementari su Mercurio dedotte da osservazioni eseguite da Terra - la natura dei suoi materiali superficiali e la sua densità - sollevavano domande di difficile risposta. Potrebbe Mercurio essere composto da una miscela omogenea di silicati e di materiali ferrosi come avviene per certi tipi di meteoriti? Oppure potrebbe Mercurio avere un grande nucleo ferroso simile a quello terrestre racchiuso da un mantello e da una crosta relativamente sottili formati prevalentemente da silicati? Se Mercurio è differenziato chimicamente come lo è la Terra, e le prove sembrano deporre a favore di questa teoria, il diametro del suo nucleo ferroso corrisponde a tre quarti del diametro del pianeta; avrebbe cioè le dimensioni della Luna!

Poiché Mercurio è il pianeta più interno del sistema solare, con una elongazione massima di 28 gradi (elongazione è la distanza angolare nel cielo di un pianeta dal Sole), è notoriamente difficile studiarlo con le tecniche astronomiche convenzionali. Ora siamo in grado di valutare quanto seriamente queste tecniche possono essere compromesse dalla contaminazione con la luce solare. (Per fare un paragone, Marte appare più grande nel mezzo della notte, quando la Terra si trova proprio tra esso e il Sole). Recentemente, nel 1962, uno dei principali esperti nell'osservazione visiva e fotografica dei pianeti scrisse, in quello che fu poi il libro più autorevole sull'astronomia planetaria, che Mercurio ruota a una velocità tale che un emisfero è rivolto costantemente verso il Sole, proprio

La superficie ricca di crateri di Mercurio è stata ripresa per la prima volta verso la fine del marzo 1974 dalle macchine fotografiche situate a bordo di *Mariner 10*. L'immagine ad alta risoluzione mostra una tipica regione fortemente craterizzata, molto simile alla superficie della Luna, in prossimità dell'equatore del pianeta. Le immagini inviate da *Mariner 10* hanno reso possibile correlare un sistema di riferimento precedentemente basato sulle longitudini a una specifica caratteristica topografica per eseguire una mappa dettagliata. Nel 1970 l'Unione astronomica internazionale ha definito l'origine delle longitudini planetografiche come il meridiano passante per il punto subsolare nel primo perielio del 1950. Si è ora concordato che il meridiano dei 20 gradi passa per il centro di un piccolo cratere caratteristico che si trova immediatamente a fianco del grande cratere situato quasi al centro di quest'immagine. Il piccolo cratere, il cui diametro è di 1,5 chilometri e che si trova a 0,58 gradi a sud dell'equatore, è ai piedi del fianco esterno del grande cratere in una posizione equivalente alle ore otto su un quadrante d'orologio. È stato chiamato Hun Kal, che significa 20 nel linguaggio dei Maya, i quali usavano un sistema numerico a base 20. La fotografia è riprodotta con il nord a destra per poter includere quanto più possibile dell'inquadratura ripresa da *Mariner 10*.

come un emisfero della Luna è rivolto costantemente verso la Terra. Questa rotazione sincrona era una conseguenza del fatto che si supponeva che Mercurio compisse una rotazione completa intorno al suo asse ogni 88 giorni, che è proprio il periodo della sua rivoluzione attorno al Sole. In verità, si diceva che la rotazione del pianeta era sincrona con la sua rivoluzione attorno al Sole con la precisione di una parte su diecimila. Nello stesso periodo gli spettroscopisti, lavorando su due differenti lunghezze d'onda, arrivarono alla conclusione che Mercurio aveva una sottile atmosfera. Tale conclusione fu indipendentemente suffragata dal fatto che si osservavano, attraverso il disco del pianeta, variazioni del grado di polarizzazione della luce solare riflessa. Ora sappiamo che Mercurio non ha affatto atmosfera e che non ne ha avuta alcuna per miliardi di anni. E il pianeta non compie in sincronia i suoi moti di rotazione e di rivoluzione.

D'altro canto, artisti fantasiosi hanno comunemente raffigurato la superficie di Mercurio come somigliante alla superficie della Luna e la loro intuizione è risultata corretta. Le fotografie di *Mariner 10* rivelano che la superficie di Mercurio è straordinariamente simile a quella della Luna, non solo per le sue caratteristiche, ma anche per la sequenza degli eventi che sono stati necessari per produrle. Mercurio rappresenta dunque un paradosso planetario: esso è simile alla Luna in superficie, ma la sua struttura interna è uguale a quella della Terra, fino al punto di manifestare un campo magnetico molto simile a quello terrestre.

Nel 1962, dopo secoli di insoddisfacenti osservazioni alle lunghezze d'onda della radiazione visibile, furono rivelate onde radio provenienti da Mercurio. I radioastronomi dell'Università del Michigan osservarono il pianeta vicino all'elongazione massima, allorché metà del suo disco, visto dalla Terra, è illuminato dal Sole e metà è in ombra. Se Mercurio avesse rotazione e rivoluzione sincrone, il lato oscuro non riceverebbe mai alcuna radiazione diretta dal Sole e sarebbe perennemente freddo. Quindi l'emissione termica (incluse le onde radio) proveniente dal lato oscuro sarebbe estremamente bassa, ben al di sotto del limite minimo rivelabile. I ricercatori furono sorpresi di scoprire un sostanziale flusso totale di onde radio che aveva evidentemente origine sia dalla metà oscura del pianeta sia dalla metà illuminata dal Sole, corrispondente a una temperatura media nei pressi della superficie compresa tra 350 e 400 kelvin ossia tra 77 e 127 gradi centigradi. Una tale temperatura media apparente è esattamente quella che un qualsiasi oggetto simile alla Luna manifesterebbe nell'orbita di Mercurio se stesse ruotando attorno al suo asse con una velocità superiore a quella della rotazione sincrona nella quale si ha una rotazione a ogni rivoluzione. Gli astronomi, però, erano così legati all'idea della rotazione sincrona che si presuppose generalmente che l'anomala emissione termica proveniente dalla metà oscura dovesse indicare la presenza di una atmosfera capace di trasportare calore dal lato illuminato al lato oscuro.

Nel 1965 Rolf B. Dyce e Gordon H. Pettengill misurarono accuratamente le differenze tra le frequenze degli impulsi radar di ritorno inviati ai contorni di Mercurio dall'Osservatorio di Arecibo. Conclusero che il pianeta non ruotava in sincronia con la rivoluzione attorno al Sole, ma aveva invece un periodo di rotazione di 59±5 giorni in senso diretto (lo stesso senso di rotazione della Terra). Essi, però, non menzionarono nella pubblicazione scientifica dei loro risultati il fatto che questa scoperta spiegherebbe l'«anomala» emissione di calore da parte del lato oscuro del pianeta, così che ancora un anno dopo, fu dedicato alla putativa atmosfera di Mercurio e al suo presunto ruolo nel trasporto di calore un dettagliato articolo.

Perché un periodo di rotazione di 59 giorni? Giuseppe Colombo, un astronomo italiano esperto in dinamica planetaria da tempo interessatosi a Mercurio, ha subito notato che un periodo di 59 giorni stava nel rapporto di circa 2 a 3 con il periodo dell'anno mercuriano. Colombo avanzò l'ipotesi che il periodo di rotazione di Mercurio fosse, in realtà, precisamente di 58,65 giorni, il che significa che il pianeta farebbe tre rotazioni esatte ogni due rivoluzioni attorno al Sole, esibendo quindi il fenomeno di accoppiamento rotazione-orbita. L'ipotesi è stata pienamente confermata non solo da ulteriori osservazioni radar, ma anche dalle foto eseguite da *Mariner 10*.

È estremamente improbabile che Mercurio esibisca l'accoppiamento rotazione-orbita per una semplice coincidenza. È più verosimile che un'interazione gravitazionale col Sole, come quella che si ha per le maree, abbia diminuito il suo momento angolare rallentando l'alta velocità di rotazione originale del pianeta fino a intrappolarlo nell'attuale periodo

Due emisferi di Mercurio, ciascuno circa per metà in ombra, furono fotografati durante il primo incontro di *Mariner 10* col pianeta nel marzo 1974. Il mosaico di foto ad alta risoluzione a sinistra mostra l'emisfero durante la fase di avvicinamento quando cioè la sonda spaziale si avvicinava al pianeta, prima di spostarsi verso il suo lato oscuro. La linea d'ombra a destra si trova a circa dieci gradi di longitudine ovest. Poiché la sonda *Mariner 10* si è avvicinata a Mercurio provenendo da sotto il piano della sua orbita, il centro del disco nella panoramica a sinistra sta circa venti gradi sotto l'equatore. L'area entro il rettangolo superiore, che racchiude il cratere Kuiper con le sue ramificazioni chiare, appare ingrandita nelle fotografie della pagina a fronte. L'area del rettangolo inferiore appare ingrandita a pagina 44. Il mosaico a destra mostra l'emisfero di Mercurio ripreso quando la sonda *Mariner 10* si allontanava dopo essere passata dietro il lato oscuro del pianeta. La linea di ombra a sinistra è situata a circa 190 gradi di longitudine ovest. La grande struttura d'impatto chiamata Mare Caloris, paragonabile al Mare Imbrium della Luna, è visibile per metà sulla linea d'ombra proprio a nord del centro del disco. La regione compresa entro il rettangolo è mostrata alle pagine 46 e 47, in una sequenza di immagini fotografiche a risoluzione crescente.

Il cratere Kuiper, così chiamato in onore del defunto Gerald P. Kuiper, che ha collaborato al programma fotografico di Mercurio svolto da *Mariner 10*, appare nella veduta panoramica (*in alto*) ripresa durante il primo sorvolo del pianeta. I rettangoli bianchi individuano la posizione delle due inquadrature ad alta risoluzione (*in basso*) riprese durante il terzo sorvolo di *Mariner 10* avvenuto il 16 marzo 1975. Il cratere Kuiper, il cui diametro è di circa 40 chilometri, riflette la luce solare più intensamente di qualsiasi altra formazione osservata su Mercurio. L'immagine in alto è stata elaborata con un calcolatore per evidenziare le caratteristiche di piccole dimensioni sopprimendo la maggior parte delle variazioni di riflettività. Le due inquadrature ad alta risoluzione mostrano fasci di crateri secondari prodotti dai materiali espulsi dall'impatto che ha formato il cratere Kuiper. La risoluzione in queste due inquadrature è di circa 250 metri.

Un terreno molto caratteristico si trova a sud-est del cratere Kuiper e agli antipodi del Mare Caloris. L'area mostrata nell'immagine a sinistra è quella compresa nel rettangolo inferiore del mosaico che compare a sinistra a pagina 42. Si ritiene che il terreno collinoso e striato qui mostrato si sia originato per gli effetti sismici del grande impatto che creò il Mare Caloris sul lato opposto del pianeta. Il grande cratere al centro della fotografia, con due piccoli crateri sul suo fondo, ha un diametro di circa 170 chilometri. L'area contenuta nel rettangolo bianco dell'immagine a sinistra appare ingrandita nell'immagine a destra ripresa durante il terzo sorvolo di *Mariner 10* sul pianeta. In quest'ultima ripresa fotografica è possibile distinguere strutture superficiali che abbiano dimensioni superiori a 450 metri. Il grande cratere al centro ha un diametro di circa 55 chilometri.

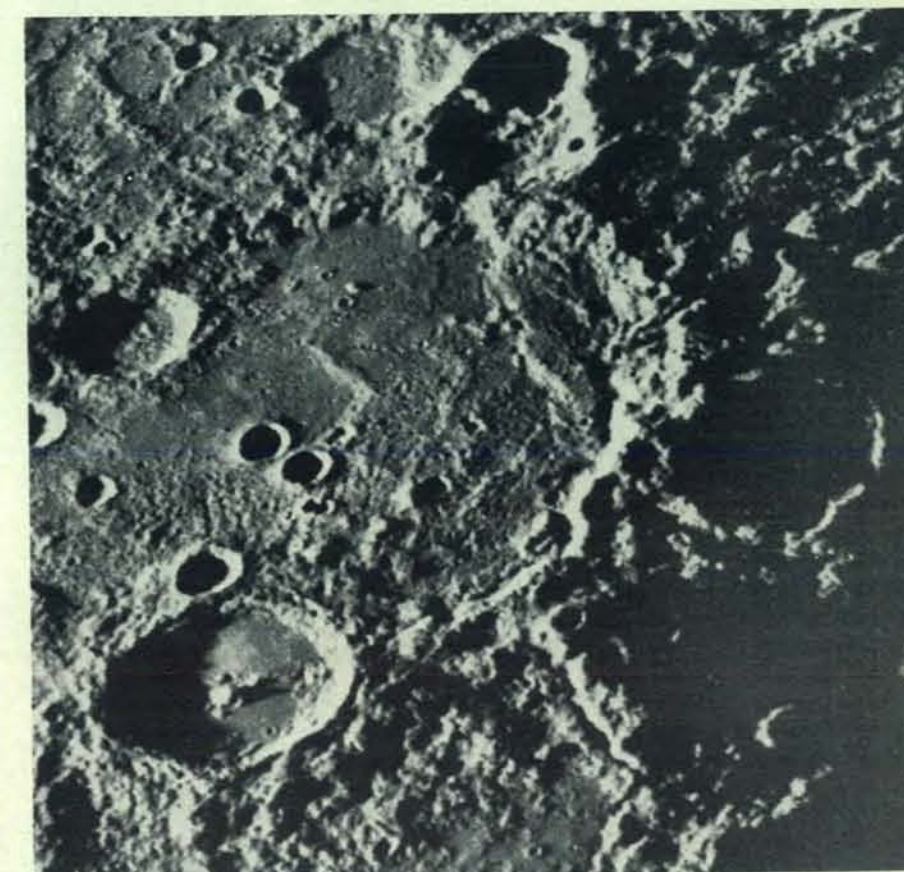
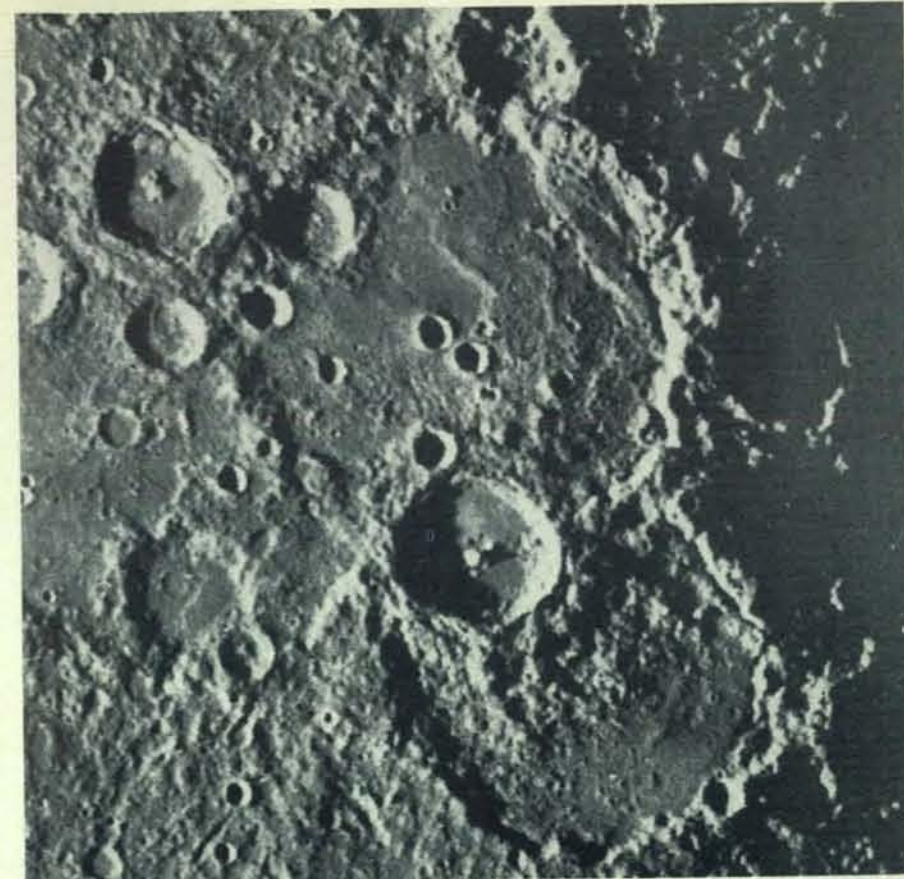
risonante. Tale teoria fu prontamente sviluppata da Peter Goldreich e Stanton J. Peale e da G. Colombo e Irwin I. Shapiro.

Il successo della missione di *Mariner 10* è dipeso da una interazione a tre corpi che richiedeva l'intervento di Venere. La sonda spaziale ha inizialmente seguito un percorso che l'ha portata vicino al pianeta Venere, ove la sua traiettoria è stata deviata verso l'orbita di Mercurio. In questo modo è stata ottenuta un'orbita completamente differente attorno al Sole, un'orbita che sarebbe stata altrimenti del tutto irraggiungibile con un veicolo di lancio del tipo Mariner. La nuova orbita ha portato *Mariner 10* a incontrare Mercurio quasi al perielio di essa (il punto più vicino al Sole), allorché il pianeta, percorrendo la propria orbita eccentrica, era quasi al suo afelio (il punto più distante dal Sole). Una particolarità di questo «colpo di biliardo» su scala cosmica così ben riuscito è che la nuova orbita di *Mariner 10* ha un periodo esattamente doppio del periodo dell'orbita di Mercurio. Il risultato è che *Mariner 10* ritornerà ogni due anni mercuriani a passare vicino a Mercurio esattamente alla stessa longitudine rispetto a un sistema di riferimento eliocentrico. Poiché Mercurio stesso compie tre rotazioni esatte attorno al proprio asse in due anni mercuriani, a ogni incontro con *Mariner 10* l'orientazione del pianeta nello spazio e l'illuminazione della sua superficie saranno perfettamente identiche (*si veda l'illustrazione in alto a pagina 48*). Così Mercurio, il Sole e la sonda spaziale sono in uno stato dinamico di risonanza tripla.

Fra tutti i pianeti del sistema solare Mercurio ha l'ambiente superficiale più inospitale. Quando si trova al perielio, esso riceve una quantità di energia solare che per unità di superficie è dieci volte superiore a quella che riceve la Luna. A mezzogiorno le temperature al suo equatore arrivano fino a 700 kelvin, e sull'emisfero oscuro la superficie si raffredda per irraggiamento fin sotto i 100 kelvin. Inoltre, il «mezzogiorno» dura a lungo al perielio di Mercurio a causa dell'accoppiamento della rotazione del pianeta col periodo della sua orbita eccentrica. Un osservatore che si trovasse su Mercurio al perielio vedrebbe il Sole rallentare nel suo moto attraverso il cielo fino a fermarsi completamente e poi muoversi lentamente per otto giorni in direzione retrograda, cioè verso ovest lungo le costellazioni (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 48*). Il motivo è che la velocità angolare orbitale nei pressi del perielio supera la velocità angolare di rotazione. Per di più, le zone che al perielio ricevono la radiazione solare per un tempo più lungo sono sempre quelle prossime alle stesse longitudini: 0 gradi e 180 gradi. Le zone prossime ai 90 e ai 270 gradi di longitudine ricevono la loro massima irradiazione solare all'afelio. Il risultato è che i meridiani corrispondenti a 0 gradi e 180 gradi ricevono una quantità di radiazione solare che è in totale due volte e mezzo quella ricevuta dai meridiani che distano da loro 90 gradi. Quindi, anche se l'asse di rotazione di Mercurio è probabilmente perpendicolare al piano dell'orbita del pianeta, di modo che non ci sarebbero variazioni di stagione con la latitudine come avviene invece per la Terra e per Marte, l'accoppiamento rotazione-orbita di Mercurio dà origine a una variazione stagionale della temperatura con la longitudine.

Un'altra interessante proprietà di Mercurio è che nelle sue regioni equatoriali le temperature al di sotto della superficie sono sempre sopra il punto di congelamento dell'acqua e nelle regioni polari le temperature al di sotto della superficie sono molto inferiori alla temperatura di congelamento. Sulla Luna o su Marte l'acqua allo stato liquido di origine interna non può raggiungere la superficie (a meno che non intervenga l'attività vulcanica) poiché le temperature al di sotto della superficie sono ovunque inferiori alla temperatura di congelamento per una profondità di molti chilometri. Per quanto riguarda Mercurio, tenendo conto della grande variazione di irradiazione solare con la longitudine e della possibilità che ci sia una variazione con la latitudine dell'alterazione chimica probabilmente associata all'occasionale fuoriuscita di acqua da sotto la superficie, ci si potrebbe aspettare di rilevare alcuni caratteristici effetti sulla superficie di determinate zone del pianeta. In realtà, ci siamo meravigliati di non riscontrare nessuno di tali effetti né sulle mappe radar eseguite da Terra né nelle fotografie inviate da *Mariner 10*.

La superficie illuminata osservata da *Mariner 10* quando si avvicinò a Mercurio per la prima volta è dominata da crateri e bacini, che creano un paesaggio che potrebbe facilmente essere confuso con quello lunare. Vi sono, però, differenze significative. Le regioni fortemente craterizzate di Mercurio presentano cospicue pianure o aree relativamente lisce, tra i crateri e i bacini, mentre le zone montuose della Luna generalmente mostrano crateri molto ravvicinati e, a volte, sovrapposti. Sembra che in molti casi le pianure situate tra un cratere e l'altro siano antecedenti alla formazione della maggior parte dei grandi crateri d'impatto di Mercurio. La superficie di Mercurio si differenzia inoltre da quella lunare per il fatto che i grandi crateri aventi diametro tra 20 e 50 chilometri sono relativamente pochi.

Un fattore che contribuisce a rendere l'aspetto della superficie di Mercurio di

Le immagini, riprese da *Mariner 10* a 176 giorni l'una dall'altra, durante il primo (*in alto*) e il secondo sorvolo (*in basso*), mostrano che l'angolo di illuminazione solare è nelle due occasioni virtualmente identico, convalidando quindi la precedente scoperta che Mercurio ruota intorno al proprio asse tre volte ogni due giri di rivoluzione intorno al Sole. Il periodo di rivoluzione di questo pianeta è, infatti, di 88 giorni e quello di rotazione è di 58,65 giorni. L'immagine in basso è stata ripresa da una minore distanza.

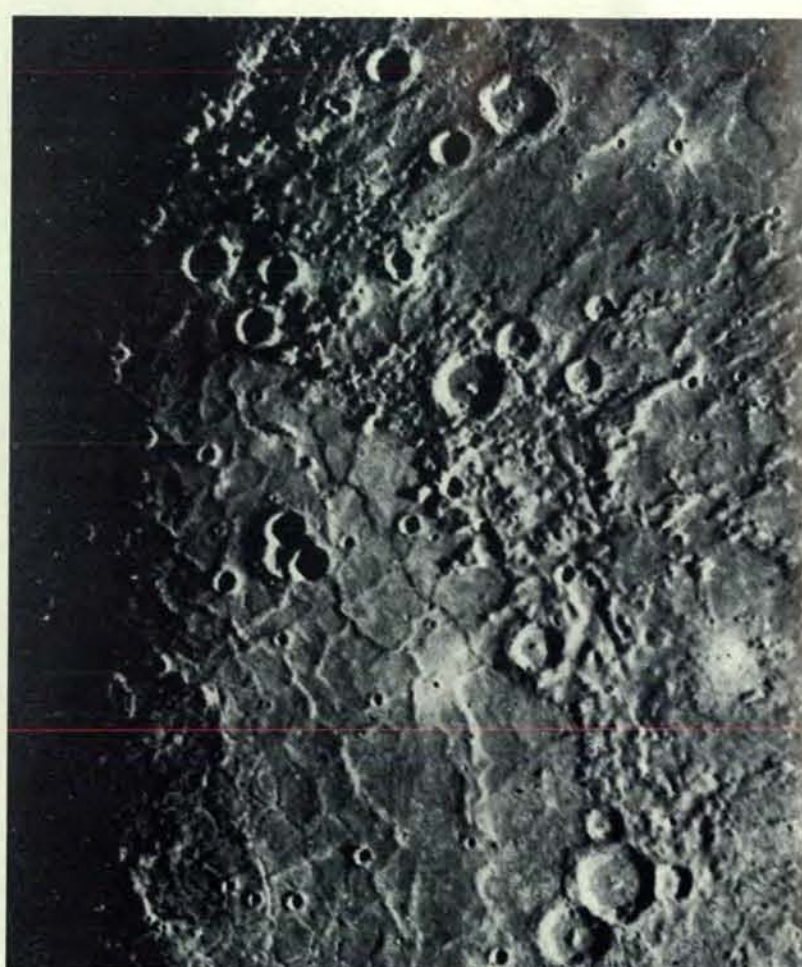
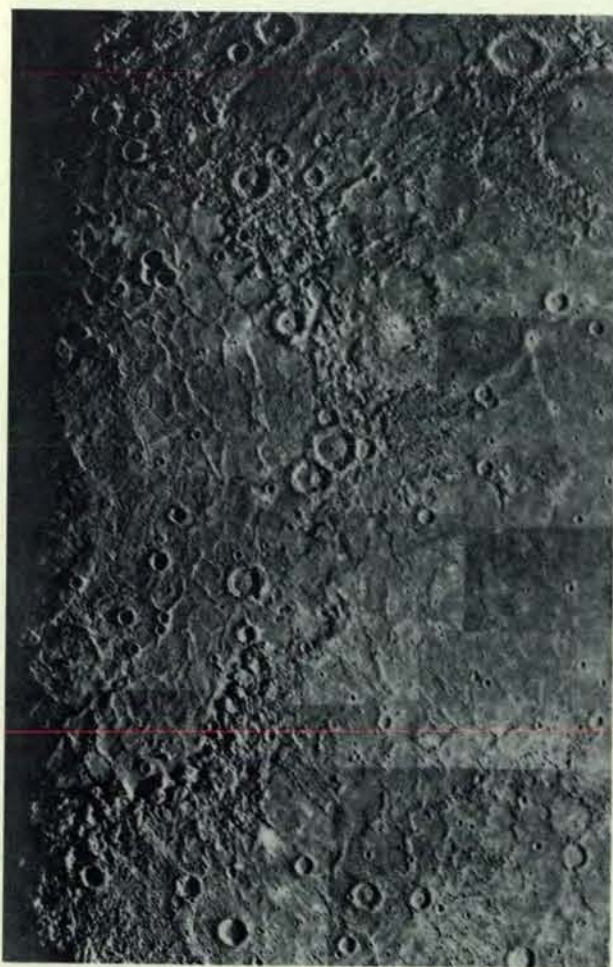
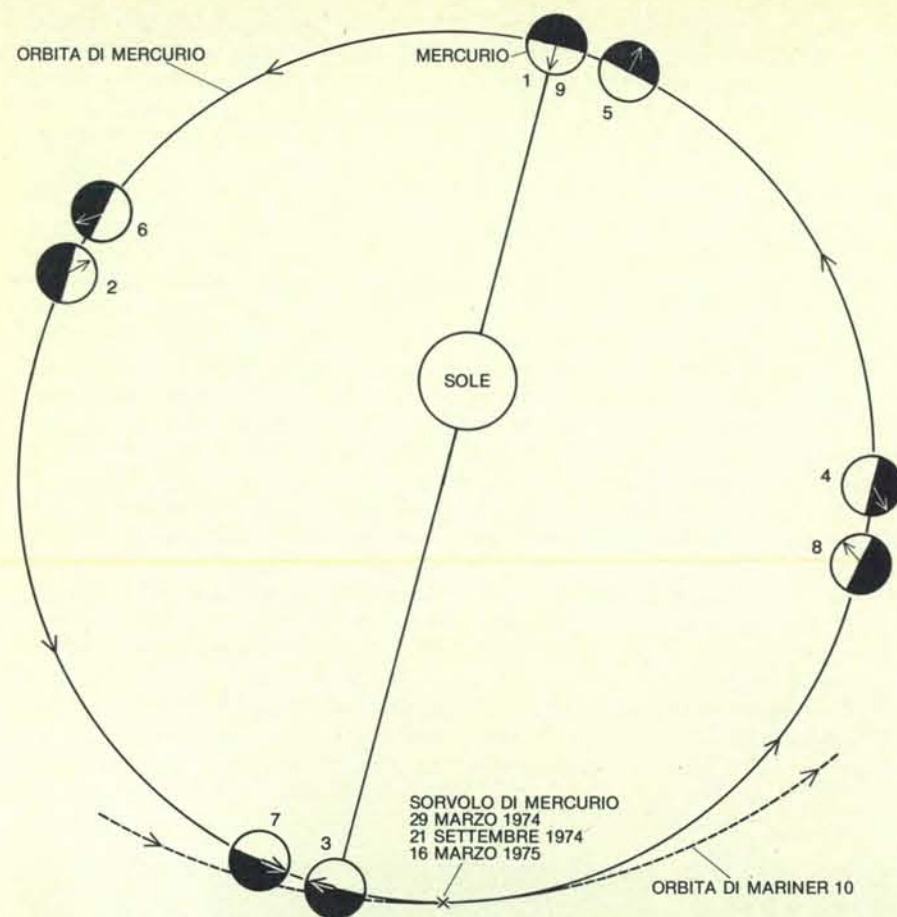
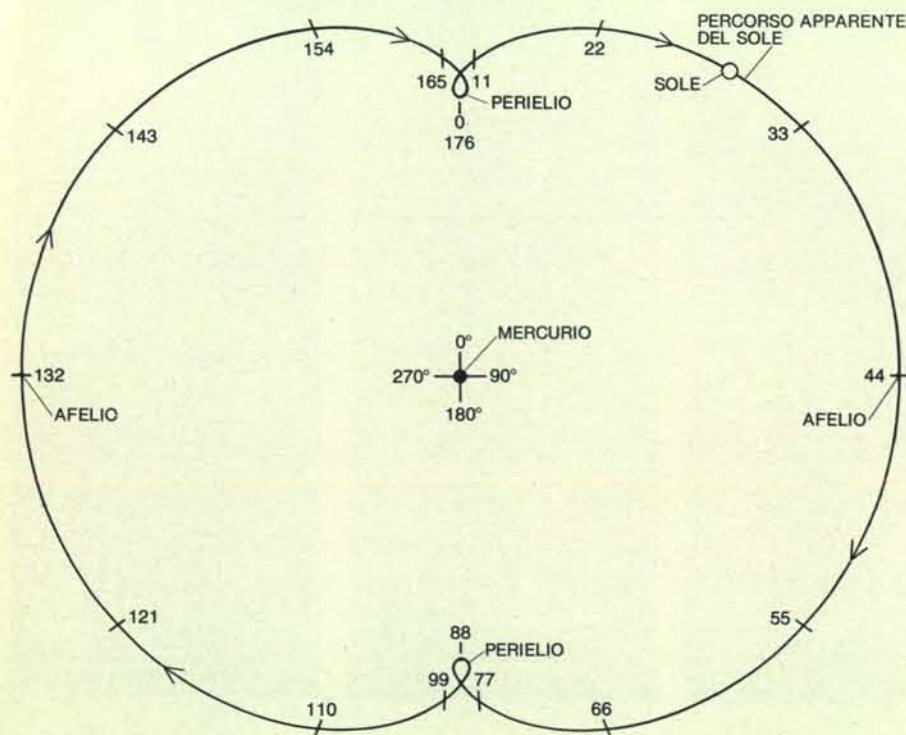
verso da quello della Luna è stato suggerito da Donald E. Gault della National Aeronautics and Space Administration. Egli fa notare che, poiché sulla superficie di Mercurio la forza di gravità è il doppio di quella sulla Luna, il materiale espulso da un cratere d'impatto primario su Mercurio ricoprirà un'area grande solo un sesto dell'area ricoperta sulla Luna per un cratere d'impatto delle stesse dimensioni. Su Mercurio i crateri d'impatto secondario sono raggruppati intorno ai crateri primari molto più strettamente di quanto lo siano sulla Luna. Il risultato è che i segni di eventi primitivi sulla topografia di Mercurio possono essersi conservati meglio di quanto avviene sulla Luna ove i materiali espulsi dai bacini d'impatto più recenti hanno ricoperto buona parte della superficie più antica.

Un'altra differenza importante fra le regioni fortemente craterizzate di Mercurio e quelle della Luna è che sono presenti dappertutto scarpate molto frastagliate che si prolungano per centinaia di chilometri. La struttura di queste caratteristiche scarpate suggerisce che esse siano il risultato di un primitivo periodo di accorciamento crostale su scala globale. Tali strutture non sono invece abbondanti sulla Luna o su Marte. Al contrario, su quei due corpi di densità inferiore si può vedere una tettonica che testimonia un allungamento crostale. Robert G. Strom dell'Università dell'Arizona e altri hanno ipotizzato che le scarpate frastagliate di Mercurio siano il risultato di un lungo periodo di accorciamento crostale prodotto dal lento raffreddarsi e contrarsi del grande nucleo ferroso di Mercurio. In ogni caso l'esistenza effettiva di grandi e ben conservati crateri su Mercurio, che hanno probabilmente un'età di tre o quattro miliardi di anni, prova che non vi sono stati da allora in poi processi di fusione su scala planetaria o migrazioni di zolle crostali come quelle che sono avvenute sulla Terra. Per di più, l'evidente mancanza di erosione superficiale testimonia che Mercurio non ha avuto una sia pur tenue atmosfera dalla formazione dei crateri in poi. Anzi, la superficie di Marte dimostra chiaramente come anche una atmosfera molto tenue in breve tempo riesca a modificare l'aspetto dei grandi crateri, soprattutto distruggendo quelle ramificazioni chiare, inizialmente cospicue, formate dai materiali espulsi che si irraggiano da essi.

Mentre le telecamere di *Mariner 10* rilevavano l'antico terreno craterizzato di Mercurio, il magnetometro, la sonda per il plasma e il rivelatore di particelle cariche a bordo della sonda spaziale registravano un'interazione con il «vento» di particelle cariche proveniente dal Sole che era molto più intensa di quanto era stato previsto. La traiettoria di *Mariner 10* era stata calcolata in modo che la sonda spaziale al suo primo incontro passasse sul lato oscuro del pianeta; in tal modo gli strumenti avrebbero potuto esaminare il cono d'ombra lasciato da Mercurio nel vento solare (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 49*). Un passaggio ravvicinato del veicolo spaziale, all'interno del cono d'ombra di un pianeta, permette in genere di eseguire le osservazioni meno ambigue, particolarmente quando si tratta di dimostrare la presenza di qualcosa che assomigli a un campo magnetico simile a quello terrestre.

Durante il primo sorvolo, mentre *Mariner 10* passava a circa 700 chilometri dalla superficie di Mercurio, gli strumenti preposti allo scopo rivelarono un debole campo magnetico e una interazione con il vento solare che era generalmente simile a quella terrestre. Allo scopo di ottenere osservazioni più definitive la sonda spaziale è stata pilotata da Terra in modo da effettuare il suo terzo passaggio ancora più vicino alla superficie (327 chilometri) su una rotta che l'ha portata più vicina al polo nord. Il terzo sorvolo ha confermato che l'intensità e l'orientazione del campo magnetico erano quelle predette da Norman F. Ness della NASA in base ai risultati del primo sorvolo. Mercurio ha evidentemente un campo magnetico dipolare approssimativamente allineato con l'asse di rotazione del pianeta. L'intensità del campo varia da 350 a 700 gamma alla superficie, (un gamma è uguale a 10^{-5} gauss), è cioè circa l'uno per cento dell'intensità del campo magnetico della Terra. Il campo di Mercurio è molto più intenso di quello rilevato sia su Venere, sia su Marte e sembra che sia necessario un meccanismo interno su scala planetaria affinché esso venga generato. Per di più, Mercurio è circondato da un sottilissimo strato di elio gassoso, il che suggerisce che il campo magnetico del pianeta catturi nuclei di elio dal vento solare e probabilmente anche da emanazioni superficiali.

L'esistenza su Mercurio di un campo magnetico che sembra simile a quello terrestre fornisce certamente una prova indipendente del fatto che il pianeta sia chimicamente differenziato con un nucleo ferroso. Le immagini ottenute durante il secondo sorvolo a settembre del 1974 hanno mostrato che le scarpate frastagliate viste nella prima serie di immagini si prolungano attraverso la regione polare meridionale. Le immagini ottenute durante il primo e il secondo passaggio mostrano anche che i piccoli crateri dalle ripide pareti vicini ai due poli hanno aree che sono permanentemente schermate dal Sole e che costituiscono così autentiche «trappole fredde» per qualunque sostanza volatile che può essere fuoriuscita episodicamente durante la storia di Mercurio. Queste località potrebbero essere un interessante obiettivo per un'ispezione ravvicinata che potrebbe avvenire nel XXI secolo.

L'emisfero del pianeta, fotografato da *Mariner 10* quando la sonda si stava allontanando dopo il suo passaggio ravvicinato, mostra una configurazione delle caratteristiche superficiali totalmente differente da quella presentata dall'emisfero ripreso durante la fase di avvicinamento (*si veda l'illustrazione a pagina 42*). L'emisfero in allontanamento mostra grandi aree con pianure relativamente lisce che sono chiaramente più giovani della maggior parte del terreno fortemente craterizzato visibile nell'emisfero in avvicinamento. Per di più, c'è un bacino di 1400 chilometri formato da un gigantesco impatto paragonabile a quello che ha dato origine al Mare Imbrium sulla Luna. Questa notevole caratteristica mercuriana, chiamata Ma-

L'accidentato fondo del Mare Caloris è mostrato in una sequenza di cinque immagini a risoluzione crescente. La prima immagine è un mosaico di riprese eseguite durante il primo sorvolo di *Mariner 10* su Mercurio da una distanza di circa 75 000 chilometri, quando la sonda si stava allontanando. La seconda e la terza immagine erano state riprese in precedenza durante lo stesso passaggio, quando la sonda spaziale era più vicina al pianeta. La quarta e la quinta immagine sono state riprese 352 giorni dopo, quando la sonda spaziale effettuò il suo terzo passaggio ravvicinato su Mercurio. Le fratture visibili sul fondo del Mare Caloris, hanno dimensioni variabili da circa otto chilometri a circa 450 metri, il limite della risoluzione fotografica. Il cratere più grande nella quinta immagine, ripresa da 20 000 chilometri, ha un diametro di circa 12,5 chilometri. Ciascuno dei due giovani crateri facenti parte del gruppo di tre crateri visibile nelle altre immagini ha un diametro di circa 35 chilometri.

È stato il fenomeno di accoppiamento rotazione-orbita a fissare il periodo di rotazione e il periodo di rivoluzione di Mercurio nel rapporto di due a tre. In questo diagramma dell'orbita di Mercurio le frecce non tratteggiate indicano uno dei due caldi punti subsolari, cioè i punti sull'equatore che ad alterne posizioni di perielio si trovano esattamente sotto al Sole. I numeri danno la sequenza delle posizioni del pianeta lungo la sua orbita durante due delle sue rivoluzioni intorno al Sole. Gli incontri di *Mariner 10* con Mercurio sono avvenuti esattamente nel punto contrassegnato da una X.

Il Sole visto da Mercurio sembra formare un cappio al perielio. La posizione apparente del Sole rispetto alle longitudini subsolari del pianeta è segnata a intervalli di 11 giorni per due anni mercuriani secondo uno studio eseguito da S. Soter e J. Ulrichs.

re Caloris per la sua posizione equatoriale vicino agli «ardenti» 180 gradi di longitudine di Mercurio, è, come il Mare Imbrium, completamente riempita di materiale proveniente dalle pianure.

Altre pianure, meno craterizzate e meno deformate, si estendono verso est e verso nord per centinaia di chilometri. Il gruppo di esperti che ha esaminato le riprese televisive di *Mariner 10* è arrivato alla conclusione che la sequenza temporale di queste pianure, la variazione della loro riflettività e del loro colore, le relazioni tra le loro dimensioni e la loro associazione geografica indicano tutte un episodio di vulcanismo assai esteso avvenuto dopo la fine del periodo di forte bombardamento. La risoluzione fornita dalle immagini non rivela, però, la morfologia della superficie tanto chiaramente da identificare senza ambiguità l'origine delle pianure.

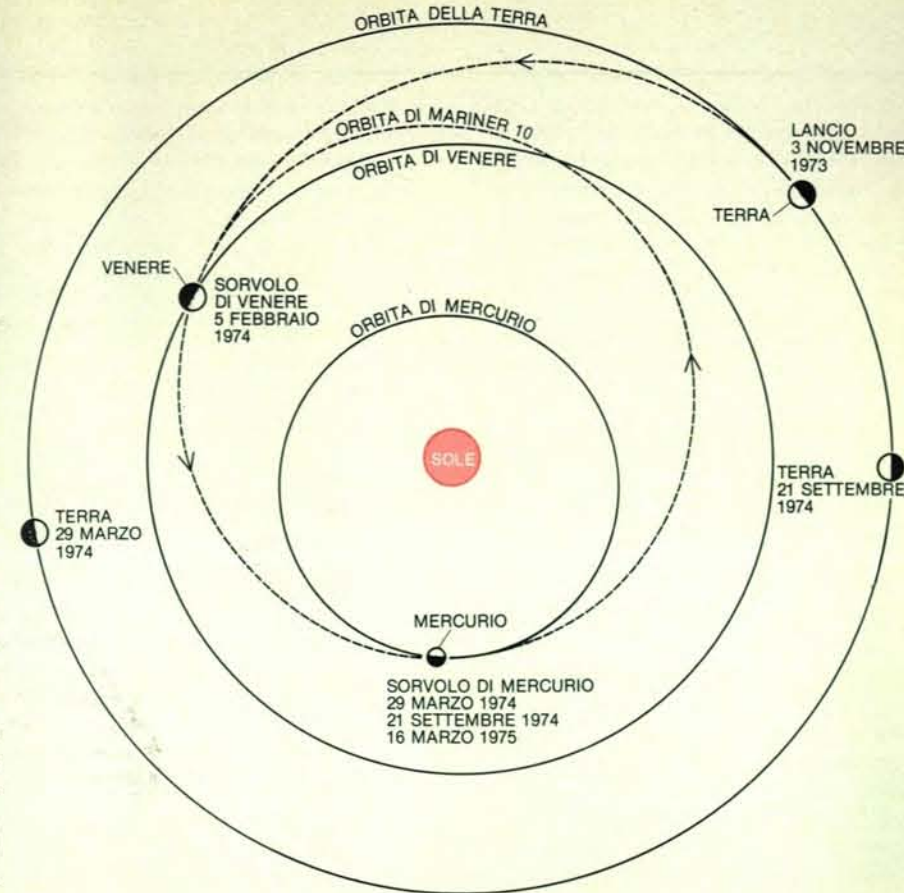
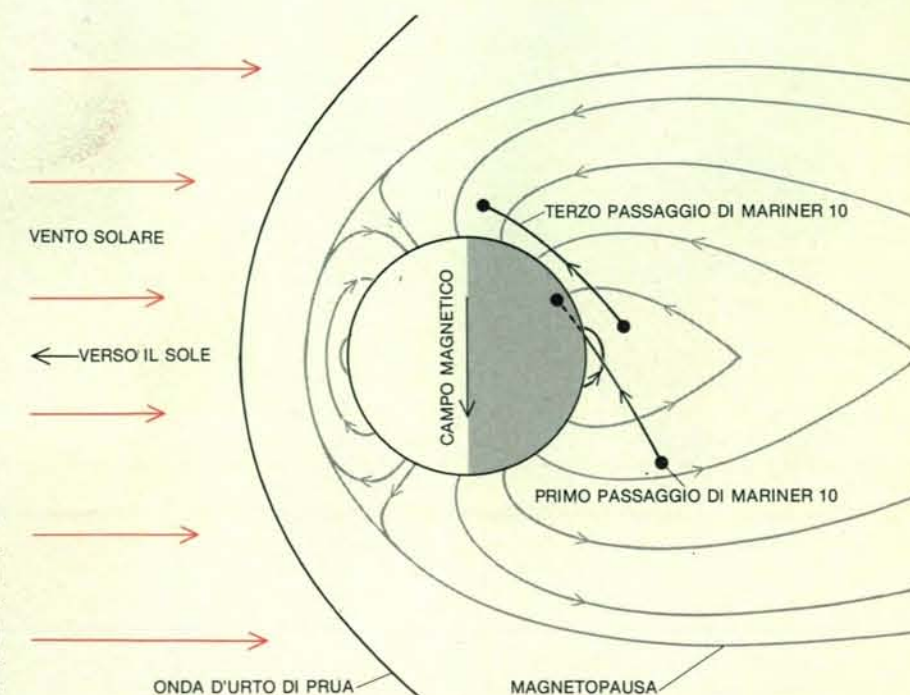
La situazione fa ricordare la disputa sull'origine delle pianure sulla Luna prima delle missioni Apollo. Sembra che alcune delle pianure lunari siano state create da giganteschi impatti piuttosto che da vulcanismo. Quindi rimane la possibilità che il materiale che ricopre le pianure mercuriane sia formato da massicce distese di frammenti espulsi da enormi crateri da impatto, probabilmente situati nell'emisfero di Mercurio che era in ombra durante i tre incontri con *Mariner 10.* Qualunque sia l'origine delle pianure, il fatto che esse non siano state deformate da attività interna e che non siano state modificate da deposizione o da erosione atmosferica attesta il notevole stato di quiescenza di Mercurio dopo la formazione delle pianure. Invero, la completa somiglianza esistente tra le sequenze di eventi che hanno modellato le superfici di Mercurio e della Luna è straordinaria e, per me, sorprendente, considerando quanto deve essere diversa la costituzione interna dei due corpi.

Una storia preliminare della superficie di Mercurio può essere suddivisa in cinque principali sequenze di eventi, ognuna generalmente simile a quelle che hanno modellato la Luna. In primo luogo, l'assenza su Mercurio di una riconoscibile modificazione dei vecchi crateri di origine vulcanica, tettonica o atmosferica implica che la massa del pianeta si sia chimicamente frazionata in un grande nucleo ferroso racchiuso da un sottile mantello silicatico ben prima della formazione di tutti i crateri più antichi. Qualsiasi atmosfera presente su Mercurio dev'essere sfuggita molto presto oppure non si formò mai. Il calore necessario per la separazione chimica su scala globale delle fasi ferrosa e silicatica deve essersi, inoltre, dissipato abbastanza presto affinché gli strati più esterni diventassero sufficientemente rigidi da mantenere fino ai nostri giorni i rilievi topografici dei grandi, antichi crateri d'impatto.

Nel periodo successivo alla fase iniziale di accumulazione e segregazione chimica, Mercurio deve avere attraversato almeno un periodo di cancellazione dei crateri, se si vuole spiegare l'assenza nella topografia dei segni lasciati dai processi di aggregazione. Le superfici lisce che sopravvivono nelle pianure esistenti tra i crateri registrano non solo la fase finale di forte bombardamento, ma anche la contrazione globale della crosta rappresentata dalla frastagliatura delle scarpate.

La terza e più nettamente delineata tra le cinque suddivisioni maggiori della storia della superficie di Mercurio si è avuta verso la fine del periodo di forte bombardamento con il grande impatto del Mare Caloris, che sembra essere il duplicato dell'impatto che ha creato sulla Luna il Mare Imbrium. La collisione avvenuta su Mercurio ha dato origine sia al Mare Caloris sia alla zona montuosa che lo circonda e ha allargato le aree ove sono presenti frammenti espulsi e cicatrici della superficie più antica. Per di più, approssimativamente agli antipodi del Mare Caloris, vi è un caratteristico terreno striato e collinoso che Gault e Peter Schultz suppongono possa essere emerso a causa del focalizzarsi dell'energia sismica proveniente dall'impatto del Mare Caloris avvenuto sul lato opposto del pianeta.

Durante la quarta fase, qualche tempo dopo l'impatto del Mare Caloris, si sono formate ampie pianure, probabilmente come risultato di un vulcanismo molto esteso simile all'attività vulcanica che ha dato origine ai mari lunari. Bruce W. Hapke dell'Università di Pittsburgh ritiene che le indicazioni colorimetriche e fotometriche ottenute tramite *Mariner 10,* combinate con i precedenti risultati ottenuti con i telescopi, indichino che le rocce superficiali di Mercurio possano essere un po' meno ricche di ferro e certamente meno ricche di titanio delle rocce trovate nei mari lunari, spiegando così l'assenza su Mercurio del netto contrasto che c'è tra la luminosità dei mari e delle zone montuose lunari.

Durante la quinta fase della storia della superficie di Mercurio, che si prolunga fino ai giorni nostri, sono avvenuti pochi eventi a parte qualche rara formazione di crateri d'impatto, molti dei quali mostrano estese ramificazioni. La distribuzione dei crateri d'impatto sulle pianure mercuriane è notevolmente simile a quella che si ha sia sui mari della Luna sia su alcune delle antiche pianure lisce di Marte. Il fatto che la frequenza degli impatti, che hanno dato origine a crateri, sia stata quasi uguale su Mercu-

La traiettoria di *Mariner 10* è stata scelta in modo che la sonda spaziale fosse deviata da Venere verso Mercurio tre mesi dopo la partenza dalla Terra. È grazie a questa deviazione ottenuta con calcoli molto accurati che l'orbita di *Mariner 10* porta la sonda nelle vicinanze di Mercurio ogni 176 giorni, ossia ogni due anni mercuriani.

L'esistenza del campo magnetico di Mercurio, rivelata durante il primo sorvolo di *Mariner 10*, è stata pienamente confermata nel terzo sorvolo quando la sonda spaziale fu guidata in modo che passasse più vicina al polo nord del pianeta. I pallini neri indicano in proiezione piana le posizioni in cui la sonda *Mariner 10* è entrata ed è uscita dal campo magnetico del pianeta durante ogni passaggio. Le linee del campo sono distorte dalla pressione delle particelle cariche presenti nel vento solare. La polarità del campo di Mercurio ha la medesima orientazione di quella del campo terrestre.

rio, sulla Luna e su Marte durante i circa tre miliardi di anni trascorsi, è stata una sorpresa per molti, considerando le grandi differenze nella distanza dei tre corpi dal Sole e quindi la forte differenza di probabilità che essi incontrino frammenti interplanetari provenienti dalla fascia degli asteroidi (che è stata a lungo ritenuta la principale sorgente degli oggetti che cadono sui corpi del sistema solare).

Così *Mariner 10* ha chiaramente stabilito che la parte esterna di Mercurio assomiglia a quella lunare, non tanto per la topografia quanto, più sorprendentemente, per la storia della sua superficie. E tuttavia la costituzione interna di Mercurio sembra essere simile a quella terrestre più di quella di qualsiasi altro pianeta. La paradossale circostanza che Mercurio ha la superficie simile a quella lunare e l'interno simile a quello terrestre solleva importanti interrogativi che riguardano non solo Mercurio, ma anche la storia e la natura di tutta la parte interna del sistema solare. Gli oggetti i cui impatti sono registrati sulla superficie di Mercurio provenivano dalla stessa famiglia di oggetti che hanno bombardato la Luna quattro miliardi di anni fa? Oppure ognuno dei pianeti interni, inclusa la Luna, è passato attraverso periodi separati di tardivo bombardamento, i quali si sono sovrapposti solo leggermente, se pure si sono sovrapposti, e che in ogni caso sono cessati bruscamente e indipendentemente?

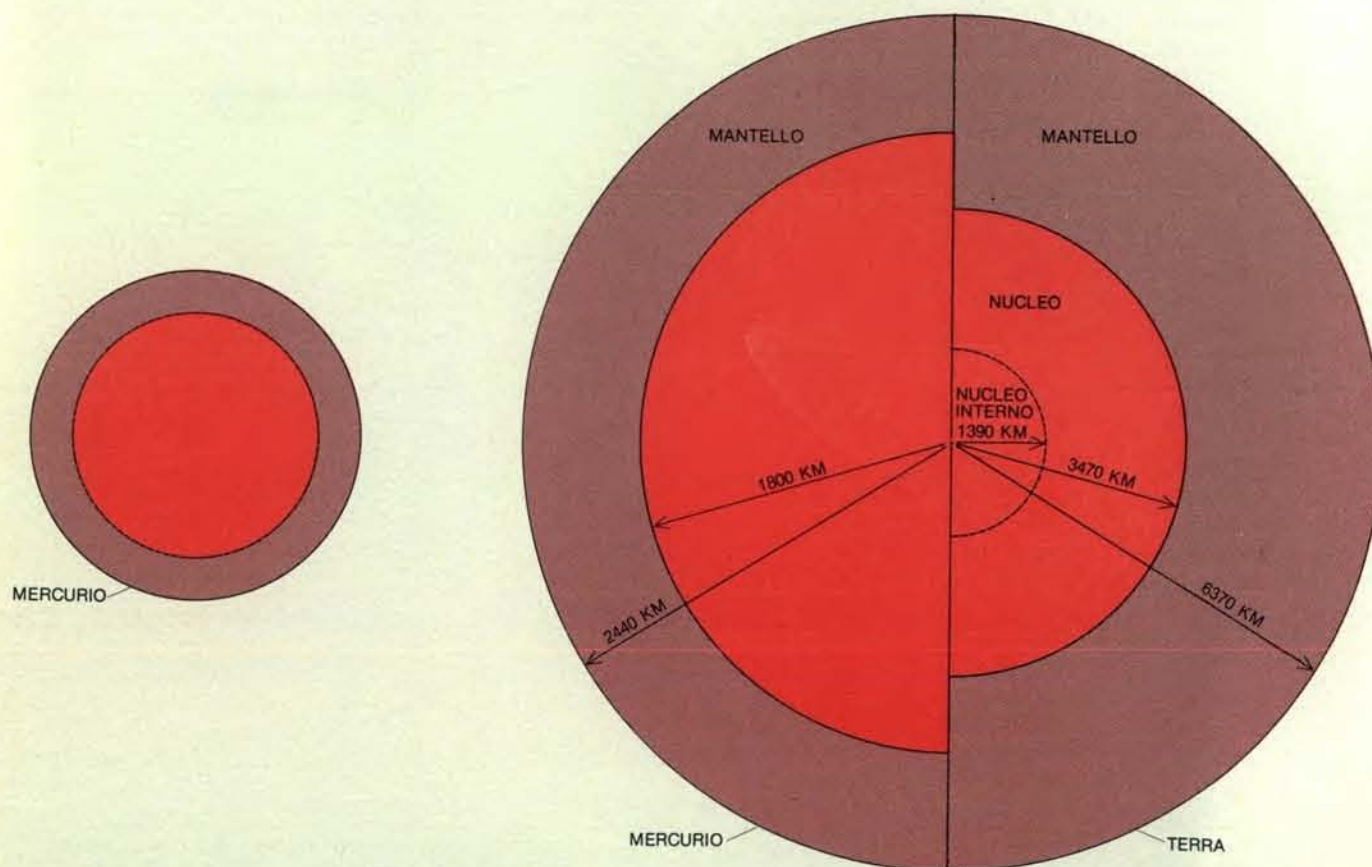
Le immagini di *Mariner 10* suggeriscono a me e a Newell J. Trask, jr., del Servizio geologico degli Stati Uniti, che l'ultimo grande bombardamento avvenuto su Mercurio, culminato con l'impatto che ha dato origine al Mare Caloris, può non aver fatto parte di un flusso costantemente decrescente di frammenti interplanetari, ma potrebbe essere il risultato di un distinto episodio finale di bombardamento. George W. Wetherill dell'Università della California a Los Angeles ritiene plausibile che gli oggetti coinvolti in tale distinto episodio primitivo possano aver avuto origine da un singolo oggetto la cui orbita iniziale al di là di Giove è stata perturbata fino a passare vicino alla Terra o a Venere. Spaccature dovute all'attrazione mareale vicino alla Terra o a Venere potrebbero poi aver concepibilmente creato uno sciame di oggetti bombardanti che sarebbero stati rapidamente spazzati via tramite collisioni con i quattro pianeti interni. Tale concetto sarebbe in accordo con le recenti controverse ipotesi che ritengono che la Luna abbia subito un simile episodico bombardamento finale circa quattro miliardi di anni fa.

D'altro canto, se la topografia osservata su Mercurio è stata creata da un bombardamento esauritosi gradualmente, le prove possono essere state cancellate bruscamente e completamente da un episodio di intensificata cancellazione dei crateri. Quindi, la parvenza di un bombardamento episodico del pianeta può essere illusoria. La disputa ora in corso sulla storia primitiva della parte interna del sistema solare fa ricordare una precedente disputa fra i fautori della teoria dell'attualismo e quelli della teoria del catastrofismo sulle cause delle caratteristiche geologiche della Terra, disputa che vide vincitori gli attualisti.

Il fatto che Mercurio abbia un campo magnetico dipolare allineato col suo asse di rotazione, molto simile al campo della Terra anche se più debole, è, per me, particolarmente inaspettato. Ammesso che probabilmente Mercurio abbia un grande nucleo ferroso, la rotazione del pianeta è, nondimeno, così lenta che, prima dell'incontro di *Mariner 10* con il pianeta, nessuno riteneva che un campo mercuriano potesse essere generato da un meccanismo fluido dinamico del tipo postulato per la Terra (in cui il campo ha origine da correnti elettriche associate con moti di fluidi nel nucleo della Terra in rotazione). E che dire di Venere, che presumibilmente ha un nucleo più grande e più caldo di quello di Mercurio e che tuttavia non mostra di possedere un campo magnetico planetario significativo? Inoltre, se ci sono moti di fluidi entro il nucleo mercuriano capaci di generare il campo magnetico osservato, i moti del nucleo o l'associato flusso di calore non hanno causato alcuna deformazione riconoscibile degli strati superficiali del pianeta.

Una ipotesi molto diversa per spiegare il campo magnetico del pianeta è che esso sia una specie di «campo fossile» che si è conservato sin da un'epoca remota. Non sembra possibile, però, che nei miliardi di anni trascorsi dalla formazione dell'ipotetico campo fossile la temperatura entro l'appropriata parte dell'interno di Mercurio non abbia mai superato il punto di Curie (la temperatura a cui una sostanza perde il suo magnetismo). Ancora una terza possibilità è che il campo sia stato in qualche modo indotto come risultato di un'interazione prolungata di Mercurio con il vento solare. Un'analisi preliminare di quest'ipotesi suggerisce che un tale campo non sarebbe simmetrico rispetto all'asse di rotazione.

Forse il campo magnetico mercuriano ha origine da cause non ancora prevedibili. O forse dovremo arrivare a comprendere più profondamente il meccanismo che genera il campo magnetico stesso della Terra per poter spiegare come quel meccanismo possa essere ridotto alla scala mercuriana. Qualunque sia la spiegazione, è una fortuna che ci sia un altro campo magnetico tra i pianeti interni con cui paragonare il campo della Terra. L'ulteriore studio del campo magnetico di Mercurio e così pure un accurato rilevamento fotografico dell'emisfero ancora inosservato del pianeta sarebbero un obiettivo di primaria importanza per qualsiasi satellite in orbita attorno a Mercurio.

La missione di *Mariner 10* verso Mercurio ha completato la ricognizione della parte interna del sistema solare e ha inoltre dimostrato che l'esplorazione planetaria è piena di sorprese. Le scoperte di *Mariner 10*, combinate con la testimonianza dei campioni lunari portati sulla Terra dagli astronauti delle missioni Apollo, hanno reso possibile un enorme accrescersi delle conoscenze e delle conclusioni riguardo a Mercurio. Dalle nuove osservazioni sta venendo fuori un quadro più ricco e più unitario sull'origine e l'evoluzione di tutti i pianeti, compreso il nostro.

Le sezioni di Mercurio e della Terra, raffigurate in scala tale da avere lo stesso diametro esterno, mostrano quanto più grande si pensa sia il nucleo ferroso di Mercurio rispetto al nucleo terrestre. Entrambi i nuclei sono rappresentati in colore intenso. La grandezza reale di Mercurio rispetto alla Terra è indicata a sinistra. Il nucleo ferroso di Mercurio contiene l'80 per cento della massa del pianeta e quindi deve avere un raggio di almeno 1800 chilometri, cioè di poco superiore a quello della Luna.

Venere

È cosparsa di crateri come altri pianeti interni, ma la sua superficie è stata modificata dalla presenza di un'atmosfera estremamente densa e nuvolosa che contribuisce a mantenere elevata la temperatura superficiale del pianeta

di Andrew e Louise Young

Fino agli anni sessanta il pianeta Venere era stato considerato « il gemello della Terra » per la sua somiglianza con il nostro pianeta quanto a dimensioni e densità e per il fatto che si tratta del pianeta a noi più prossimo nel sistema solare. Essendo più vicino al Sole, Venere è investito da una quantità di luce solare circa doppia rispetto a quella intercettata dalla Terra, ma uno spesso strato di nuvole riflette gran parte della luce cosicché il pianeta finisce per assorbire circa la stessa quantità di energia solare che la Terra assorbe. Sulla base di queste somiglianze molti astronomi erano giunti alla conclusione che sulla superficie di Venere dovevano esserci approssimativamente le stesse condizioni che si incontrano sulla Terra; pensavano, per esempio, che la durata del giorno solare fosse la stessa della Terra, che l'atmosfera contenesse gli stessi tipi di gas e che, naturalmente, le nuvole fossero vere nuvole formate da vapore acqueo, come accade sulla Terra.

Il lavoro che gli studiosi dei pianeti hanno portato avanti negli ultimi 40 anni è servito a dimostrare che questa concezione di Venere era completamente errata; anzi, malgrado molti aspetti siano ancora ignoti, siamo in grado di affermare che il pianeta Venere è assolutamente diverso dalla Terra: il pianeta Venere è caldo, la sua superficie raggiunge una temperatura di 750 kelvin (circa 900 gradi Fahrenheit, ossia circa 480 gradi centigradi), la sua atmosfera non è composta di azoto e ossigeno, ma di anidride carbonica e la pressione atmosferica sulla superficie è 90 volte più elevata che sulla Terra. L'acqua è presente in piccola quantità, mentre le nuvole contengono composti corrosivi come l'acido solforico. La rotazione del pianeta è molto lenta (un giro richiede circa otto mesi), e avviene in direzione retrograda, cosicché, se il Sole non fosse nascosto da una spessa coltre di nuvole nascerebbe a ovest e tramonterebbe a est.

Possiamo giustificare i primi errori di interpretazione riguardanti il comportamento di Venere perché, malgrado sia il pianeta che passa più vicino alla Terra, è anche uno dei più difficili da osservare soprattutto perché Venere è visibile dalla Terra sempre nella direzione del Sole e, quindi, si è costretti a osservarlo di giorno quando il cielo è luminoso, oppure al tramonto o all'alba quando il pianeta è basso sull'orizzonte e i telescopi devono penetrare il massimo spessore di atmosfera terrestre. Inoltre la superficie di Venere è continuamente coperta dalla sua atmosfera nuvolosa e le nubi stesse, alla lunghezza d'onda del visibile, sembrano completamente prive di caratteristiche.

Le osservazioni ottiche si sono rivelate dunque così poco promettenti che recentemente ci si è orientati verso altre tecniche di osservazione come quelle radio o radar. Infatti le onde radio riescono ad attraversare le nubi venusiane e con il radar si sono ottenute mappe di regioni estese della superficie del pianeta.

Fotografie scattate nell'ultravioletto hanno messo in evidenza strutture interne alle nubi che non potevano essere rivelate alla lunghezza d'onda del visibile. Osservando la luce solare riflessa dall'atmosfera di Venere alle varie lunghezze d'onda si possono ricavare non solo immagini fotografiche, ma anche informazioni sulla composizione atmosferica (dall'esame dello spettro delle righe di assorbimento), sul moto dell'atmosfera (dall'esame dello spostamento delle righe stesse) e sulle proprietà delle particelle che compongono le nuvole (dalla misura della polarizzazione della luce riflessa). Infine otto satelliti artificiali sono passati nelle vicinanze del pianeta o ne hanno attraversato l'atmosfera fornendo misurazioni dirette e, più recentemente, trasmettendo fotografie di elevata risoluzione. Nell'ottobre scorso per la prima volta due sonde planetarie, *Venera 9* e *Venera 10*, si sono posate su Venere e hanno scattato fotografie del suolo (si veda in proposito nella rubrica « Scienza e Società » la notizia a pagina 6).

Nel 1897 Edward E. Barnard dello Yerkes Observatory scriveva: « Nessun oggetto più del pianeta Venere ha causato controversie così accese e ha portato a pareri così discordi sulla determinazione del suo periodo di rotazione. La controversia sulla rotazione è in corso da due secoli ». Pochi anni più tardi

Alcune strutture della superficie di Venere, compreso un grande cratere, sono visibili nella mappa radar della pagina a fronte. La mappa, che copre un'area limitata, appena a nord dell'equatore, è un dettaglio di una mappa più ampia presa da Richard M. Goldstein e dai suoi collaboratori del Jet Propulsion Laboratory del California Institute of Technology. È stata ottenuta trasmettendo un fascio di microonde in direzione del pianeta e registrando l'eco mediante due radiotelescopi operanti come un interferometro situati a Goldstone in California. Il reticolo di punti è conseguenza della tecnica digitale con cui si è trattata l'informazione contenuta nel segnale riflesso. Le ombre che appaiono sulla superficie non sono reali, ma sono dovute a questa tecnica; i toni di grigio non corrispondono a differenti gradi di illuminazione bensì alla quantità di energia elettromagnetica riflessa. La maggior parte delle strutture superficiali hanno vasta estensione ma sono poco profonde o poco alte. La grande forma circolare è un cratere di 160 chilometri di diametro il cui bordo però misura soltanto 500 metri in altezza. La parte interna del cratere non sembra giacere a una profondità molto superiore rispetto al terreno circostante. La superficie di Venere è invisibile con le normali tecniche ottiche per lo spesso strato di nubi che avvolge l'intero pianeta.

si fece il primo tentativo di determinare la velocità di rotazione di Venere basandosi sull'effetto Doppler subito dalla luce riflessa dal pianeta. Il metodo si fonda sulla possibilità di dedurre la velocità di rotazione del pianeta misurando la differenza tra la lunghezza d'onda delle righe di assorbimento nella direzione del centro e quella nella direzione dei bordi del pianeta. La differenza di lunghezza d'onda è così piccola (proporzionale al rapporto tra la velocità di rotazione e la velocità della luce) che è un problema delicato determinarla con precisione. Nel 1956 Robert S. Richardson dei Mount Wilson and Palomar Observatories ottenne un primo risultato che sembrò suggerire che Venere ruotasse lentamente in direzione retrograda.

La controversia non si concluse con Richardson. All'inizio degli anni sessanta Bernard Guinot dell'Osservatorio di Haute-Provence in Francia, misurando la velocità orbitale dei pianeti interni, trovò che i suoi dati erano in contraddizione nel caso di Venere: la velocità ottenuta era diversa da punto a punto del pianeta. La contraddizione poteva essere spiegata supponendo che il pianeta ruotasse in direzione retrograda, ma solo se questa rotazione avveniva molto più velocemente di quanto non avesse indicato Richardson: circa 100 metri al secondo all'equatore, che corrisponde a una rotazione circa ogni quattro giorni.

Le nubi dell'atmosfera di Venere rivelano una complessa distribuzione di chiari e scuri disposti a forma di vortice. La figura mostra un mosaico di 56 fotografie scattate da una delle due telecamere situate a bordo della sonda americana *Mariner 10* che il 5 febbraio 1974 ha sorvolato la superficie di Venere a una quota di 5800 chilometri. Le fotografie sono ai raggi ultravioletti, mentre alla lunghezza d'onda della luce visibile le nubi appaiono come una omogenea palla gialla priva di strutture. L'immagine ultravioletta è probabilmente prodotta dalla disomogenea distribuzione di una sostanza che assorbe i raggi ultravioletti. L'immagine ha subito uno speciale trattamento che ne aumenta il contrasto e che sottolinea le strutture di scala più ridotta. Il mosaico, solo recentemente completato dai tecnici del Jet Propulsion Laboratory, ha una risoluzione di circa sette chilometri, migliore di quella dei precedenti mosaici costituiti da un numero inferiore di fotografie scattate da maggiori distanze dal pianeta.

La scoperta di Guinot fu confermata da osservazioni fatte seguendo un altro metodo. Osservando fotografie prese nell'ultravioletto, l'astronomo francese C. Boyer trovò che certe zone scure presenti nelle nubi apparivano di nuovo dopo quattro giorni. Il primo studio completo di Venere nelle regioni dell'infrarosso e dell'ultravioletto fu compiuto da Frank E. Ross al Mount Wilson Observatory nel 1928. Le fotografie all'infrarosso non mostravano particolari interessanti, mentre quelle all'ultravioletto mostravano vaste regioni con contorni confusi e di basso contrasto. Ross cercava delle periodicità nell'apparizioni di tali contorni, ma non ne trovò. Boyer invece intravvide comportamenti che potevano essere interpretati come dovuti alla rotazione e, stimolato dal lavoro di Guinot, prese altre fotografie. Trovò che si poteva rilevare un apparente moto retrogrado in fotogrammi scattati solo a poche ore uno dall'altro. Il moto che si osservava era coerente con l'ipotesi che la velocità di rotazione fosse di 100 metri al secondo. Moti di nubi anologhi sono stati osservati con miglior dettaglio nelle fotografie scattate dalla sonda *Mariner 10* (*si vedano le illustrazioni a pagina 62*).

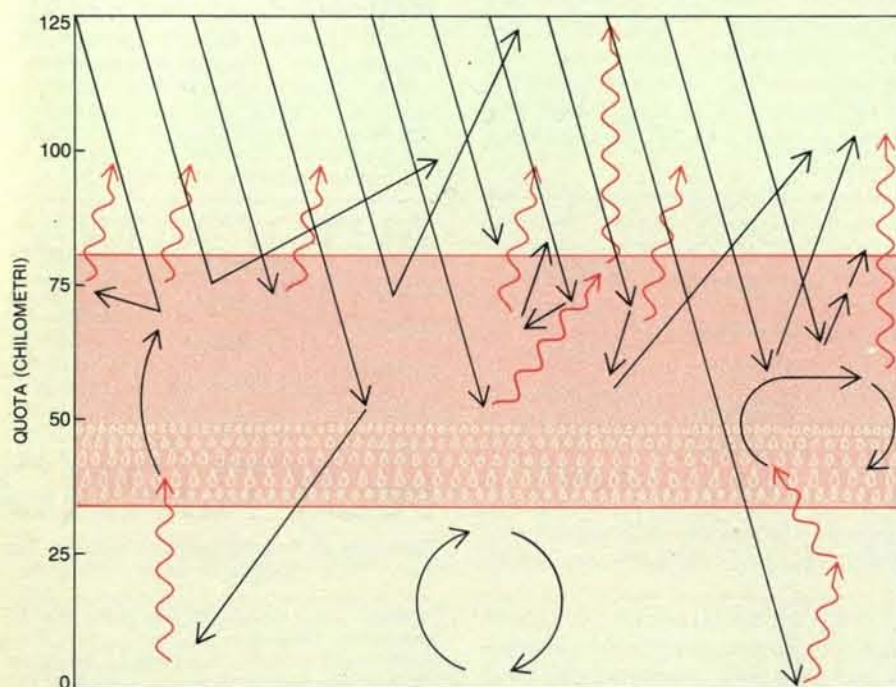
Per mezzo delle tecniche spettroscopiche e fotografiche si può misurare la velocità di rotazione soltanto dell'atmosfera di Venere, anzi soltanto degli strati più alti dell'atmosfera; con le tecniche radar, che pure si basano sull'effetto Doppler, si può invece misurare la velocità di rotazione del pianeta. La prima determinazione radar della velocità di rotazione di Venere fu pubblicata nel 1962 e confermò che la rotazione è retrograda, ma che essa avviene molto lentamente: una rotazione ogni 243 giorni terrestri.

Tale periodo di rotazione suggerisce l'idea che tra i moti della Terra e di Venere possa esistere una relazione non accidentale. A ogni congiunzione inferiore, cioè quando Venere si trova tra la Terra e il Sole, il pianeta presenta la stessa faccia alla Terra. È possibile che la rotazione di Venere sia determinata dalle forze di marea che si generano quando i due pianeti si trovano vicini. È questa la ragione per cui la Luna ruota mostrando sempre la stessa faccia alla Terra. D'altra parte, anche alla congiunzione inferiore, la Terra e Venere sono tra di loro più lontane di quanto non lo siano la Terra e la Luna e quindi le forze di marea che esercitano reciprocamente risultano molto più deboli. Se si vuole spiegare in questo modo il comportamento di Venere per quanto riguarda la sua rotazione, bisogna per forza supporre che la sua massa sia distribuita asimmetricamente, ovvero che all'equatore il pianeta devii dalla forma perfettamente sferica almeno di una parte per 10 000. Seguendo attentamente il moto di una nave spaziale che sorvoli Venere a breve distanza sarebbe possibile mettere in evidenza la presenza di irregolarità del campo gravitazionale più intense del valore suddetto, ma, fino a oggi, non ne sono state rivelate. Probabilmente non si potrà dare una risposta soddisfacente a questa questione finché non si riuscirà a mettere in orbita intorno al pianeta Venere un satellite artificiale.

Le misurazioni radar della velocità di rotazione del pianeta sono molto accurate, ma, d'altra parte, non si può ignorare che l'analisi spettroscopica e l'apparente movimento delle nubi lungo il disco portano alla conclusione che la velocità di rotazione debba essere molto più elevata. Se si suppone che entrambi i risultati siano attendibili, ci troviamo davanti al problema di spiegare come possa un pianeta che ruota lentamente avere un'atmosfera che ruoti rapidamente o, in altre parole, spiegare l'esistenza di venti eccezionalmente intensi.

Recenti misure spettroscopiche compiute da Wesley A. Traub e Nathaniel P. Carleton del Center for Astrophysics di Cambridge, nel Massachusetts, indicano che i venti di Venere possono avere velocità compresa tra zero e più di 100 metri al secondo, mentre i dati delle sonde sovietiche Venera, che sono penetrate dentro l'atmosfera venusiana, portano alla conclusione che la velocità del vento debba essere compresa tra 10 e 100 metri al secondo. Nell'atmosfera terrestre venti di tale intensità si incontrano soltanto in regioni estremamente localizzate interessate da sottili correnti a getto, ma è chiaro che tali correnti non possono spiegare i rapidi movimenti che sono stati riscontrati nell'atmosfera di Venere dal momento che i venti venusiani sembrano interessare regioni molto estese del pianeta.

L'apparente accordo tra i dati spettroscopici e quelli fotografici è stato oggetto recentemente di un attento esame. Le migliori osservazioni spettroscopiche sembrano indicare che la rotazione atmosferica sia leggermente più len-

Le sonde Mariner e Venera hanno permesso di ricostruire l'andamento della temperatura e della pressione lungo l'atmosfera venusiana, dal quale si deduce che la temperatura aumenta costantemente a partire dai 90 chilometri di quota, verso il basso. La pressione raggiunge il valore di una atmosfera (valore medio della pressione terrestre al livello del mare) vicino ai 50 chilometri di quota. Sulla superficie la temperatura si aggira intorno ai 750 kelvin e la pressione alle 90 atmosfere. Il gradiente di temperatura è mantenuto entro il valore di 10 gradi al chilometro dai processi convettivi.

L'alto valore della temperatura superficiale è una conseguenza della radiazione intrappolata dalla atmosfera di Venere. La maggior parte della luce solare incidente (*frecce rettilinee*) viene riflessa dalle nubi. Il 20 per cento circa viene assorbito al livello delle nubi più alte per la maggior parte nell'ultravioletto (da un assorbitore non identificato) e nel vicino infrarosso (dall'anidride carbonica). Il calore che la superficie assorbe lo irradia nell'infrarosso termico (*frecce ondulate*), una regione spettrale centrata a una lunghezza d'onda di poco superiore al vicino infrarosso. La radiazione infrarossa termica viene assorbita dal gas che si trova sotto le nubi e dalle nubi stesse e di conseguenza non può direttamente irraggiare nello spazio. All'interno dell'atmosfera la propagazione del calore avviene soprattutto per convezione (*frecce curve*).

ta di quanto si pensasse e precisamente sia caratterizzata da un periodo di circa sei giorni terrestri, che rimane sempre molto più breve del periodo di 243 giorni che caratterizza il moto del pianeta stesso, ma che è significativamente diverso dal periodo di rotazione di quattro giorni che si deduce dai movimenti delle nubi. Non è chiaro se mediante le due tecniche si misuri lo stesso fenomeno.

La ricerca teorica ha elaborato vari tipi di meccanismi capaci di spiegare la formazione di venti, come il moto convettivo conseguente a un differente riscaldamento dell'emisfero del pianeta rivolto verso il Sole rispetto all'altro, ma nessuno di questi è in grado di spiegare velocità maggiori di qualche metro al secondo. Inoltre qualsiasi teoria, che si proponga di spiegare il fenomeno della circolazione atmosferica di Venere, deve tener conto di altri fenomeni più complessi. Per esempio, osservazioni nell'infrarosso hanno dimostrato che gli strati superiori delle nubi si muovono verticalmente oltre che orizzontalmente e che questo movimento verticale segue una certa periodicità. Il suo periodo è variabile, ma normalmente è compreso tra quattro e sei giorni, indicando che probabilmente ciò che si osserva non è un moto di insieme di gas, ma un'onda che si propaga attraverso l'atmosfera.

Siccome la superficie del pianeta è così difficile da osservare, lo studio di Venere è spesso coinciso con lo studio della sua atmosfera e cioè in particolare della sua composizione chimica. Da sempre, il metodo più usato per studiare la chimica dell'atmosfera è stato la spettroscopia; nello spettro della luce solare riflessa dal pianeta, le caratteristiche righe di assorbimento rivelano la presenza di particolari molecole e permettono di identificarle.

La prima sostanza scoperta su Venere da Walter S. Adams e da Theodore Dunham jr., al Mount Wilson Observatory nel 1932, è stata l'anidride carbonica. Due anni più tardi Arthur Adel e V.M. Slipher del Lowell Observatory dimostrarono che, alla pressione atmosferica terrestre, per produrre righe di assorbimento così intense come quelle presenti nello spettro di Venere, sarebbe occorsa una colonna di anidride carbonica alta almeno tre chilometri, in ragionevole accordo con le più recenti stime dello spessore dello strato di gas presente al di sopra delle nubi responsabili dell'assorbimento. Attualmente Venere è la migliore fonte disponibile di spettri di anidride carbonica (*si veda l'illustrazione a pagina 58*). Negli spettri ad alta risoluzione, come quelli ottenuti da Pierre e Janine Connes in Francia, sono state identificate più di 5000 righe di assorbimento, molte delle quali non erano mai state osservate altrove; sono quelle prodotte da molecole di anidride carbonica contenenti isotopi rari, come il carbonio 13, l'ossigeno 17 e l'ossigeno 18.

All'inizio degli anni sessanta William M. Sinton del Lowell Laboratory e V. I. Moroz della Stazione meridionale dell'Istituto astronomico Shternberg in Crimea scoprirono indipendentemente la presenza di una seconda molecola nello spettro infrarosso di Venere: l'ossido di carbonio. Dimostrarono anche che Venere riflette una minima parte della luce solare alla lunghezza d'onda compresa tra tre e quattro micrometri, che si trova nel vicino infrarosso. Moroz dimostrò che la sostanza responsabile di questa banda di assorbimento non poteva essere l'acqua, ma che la sua funzione era quella di intrappolare il calore negli strati bassi dell'atmosfera di Venere, ruolo che nella nostra atmosfera è sostenuto dall'acqua. Sinton e John Strong della Johns Hopkins University scoprirono anche una larga banda di assorbimento alla lunghezza d'onda di 11,2 micrometri, nell'infrarosso termico, che si riuscì a interpretare solo dieci anni più tardi.

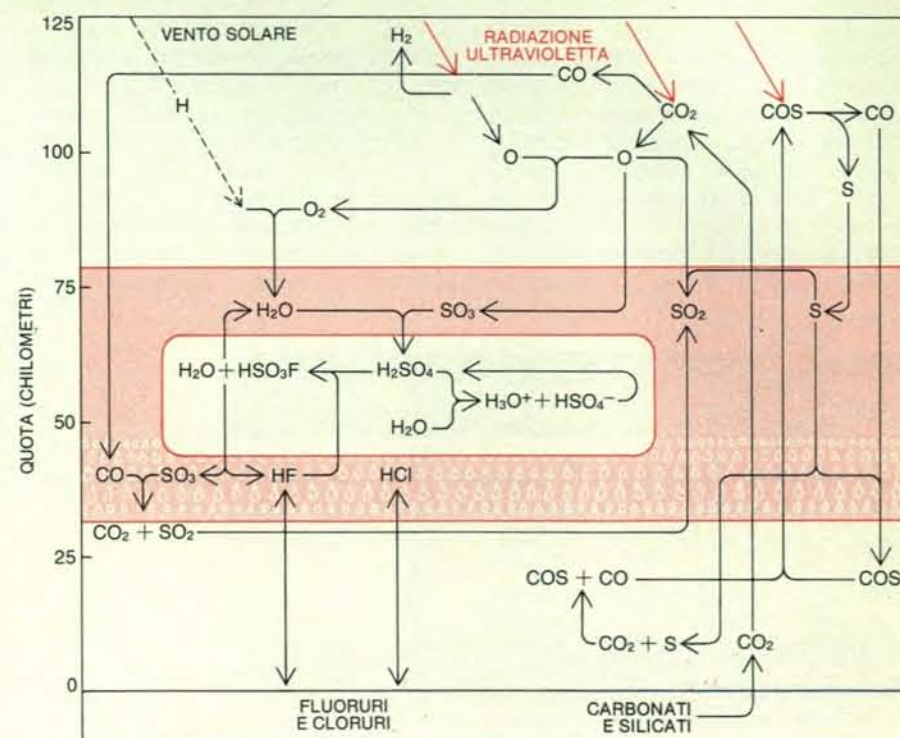
Fino a dieci anni fa, l'anidride carbonica e l'ossido di carbonio erano le uniche due sostanze la cui presenza nella atmosfera di Venere era stata confermata. A lungo si cercò di evidenziare la presenza di vapore acqueo e in vari rapporti se ne annunciò la scoperta, ma ora si pensa che si trattasse di osservazioni fuorvianti. La prima autentica osservazione di vapore acqueo su Venere è probabilmente quella effettuata da Ronald A. Schorn e dai suoi colleghi del McDonald Observatory verso la fine degli anni sessanta. Dopo di allora l'abbondanza del vapore acqueo nell'atmosfera venusiana è stata misurata molte volte da Edwin S. Barker del McDonald Observatory e si è visto che l'umidità relativa raramente raggiunge l'unc per cento.

L'analisi degli spettri di assorbimento di Venere è servita anche a indagare sulla presenza dell'elemento più abbondante nell'atmosfera terrestre: l'ossigeno. L'esito della ricerca è stato negativo e l'assenza di ossigeno costituisce un vero enigma. L'ossido di carbonio presente su Venere si forma presumibilmente negli strati più alti dell'atmosfera per dissociazione dell'anidride carbonica operata dalla luce ultravioletta. Inevitabilmente questa reazione dà come sottoprodotto ossigeno, e poiché l'ossigeno molecolare è biatomico, ci dovrebbe essere un numero di molecole di O_2 pari alla metà del numero delle molecole di CO. Tale è il rapporto che si osserva su Marte, un altro pianeta la cui atmosfera è composta soprattutto da anidride carbonica, mentre su Venere l'ossigeno è almeno 50 volte meno abbondante dell'ossido di carbonio.

Si potrebbe facilmente spiegare la scarsità di ossigeno se questo venisse immediatamente trasferito negli strati più bassi dell'atmosfera dove si potrebbe combinare con altri elementi come lo zolfo. In tal caso però bisognerebbe supporre che il rimescolamento dei gas nella stratosfera sia un processo molto più efficiente su Venere che sulla Terra.

Recentemente è diventato possibile analizzare l'atmosfera di Venere mediante metodi più diretti della spettroscopia. Su due delle sonde Venera sono stati installati strumenti per la campionatura dell'atmosfera. Sfortunatamente tali strumenti erano in grado di rivelare soltanto alcuni gas, ma non di fornire informazioni su molecole che non erano state previste. D'altra parte la loro presenza nell'atmosfera avrebbe potuto interferire nell'analisi e portare a risultati scorretti.

Nonostante queste difficoltà le sonde Venera sono state in grado di determinare l'abbondanza dell'anidride carbonica nell'atmosfera di Venere. Si è visto che essa è il costituente principale (ammonta, infatti, al 97 per cento di tutta l'atmosfera) e non uno dei minori, come sostenevano alcuni teorici. D'altra parte i dati trasmessi dalle sonde Venera hanno accresciuto la confusione per quanto riguarda la percentuale di vapore acqueo avendo indicato un valore che è almeno 1000 volte superiore a quello ricavato mediante l'analisi spettroscopica.

Studi successivi eseguiti alle lunghezze d'onda radio hanno recentemente confermato che nella parte inferiore dell'atmosfera non vi è più dello 0,1 o 0,2 per cento di vapore acqueo e il valore effettivo è probabilmente più vicino allo 0,01 per cento. Le sommità delle nubi sono ancora più aride. Ora si pensa che le misurazioni effettuate dalle sonde Venera siano state falsate da materiali presenti nelle nubi venusiane.

Le condizioni della superficie influenzano in modo determinante la chimica dell'atmosfera. L'anidride carbonica viene liberata dalle rocce a causa dell'elevata temperatura dopo di che, al di sopra delle nubi, si scinde parzialmente in ossido di carbonio (CO) e ossigeno (O_2). L'ossigeno può partecipare a una serie di reazioni che culminano nella produzione di acido solforico (H_2SO_4), che, insieme a tracce minori di acido cloridrico (HCl) e acido fluoridrico (HF) si pensa sia il costituente delle particelle delle nubi. È possibile che siano presenti anche zolfo allo stato elementare e suoi composti più carbonio e ossigeno. Le reazioni che avvengono al di sopra delle nubi sono prevalentemente fotochimiche, mentre quelle al di sotto termochimiche. Le reazioni che coinvolgono molecole allo stato liquido sono racchiuse nel rettangolo bianco; tutte le altre avvengono fra molecole allo stato gassoso. L'acqua scarseggia; una parte può essere andata persa per la dispersione dell'idrogeno nello spazio, ma se ne può essere anche formata una parte per cattura dell'idrogeno contenuto nel vento solare.

Determinare la composizione delle nubi è ancora più difficile che identificare i gas dell'atmosfera perché i liquidi e i solidi non danno origine a righe spettrali definite come avviene per i gas. Quando le nubi si osservano alla lunghezza d'onda del visibile appaiono di un pallido giallo uniforme; solo nell'ultravioletto compaiono strutture distinguibili; in queste fotografie l'intero pianeta appare grigio, ma con alcune regioni più scure di altre. Se queste « macchie » sono causate dalla distribuzione non uniforme di qualche materiale che assorbe la radiazione ultravioletta, ci dobbiamo chiedere di che cosa si tratti e perché la sua distribuzione non sia omogenea.

Il fatto che le nubi siano gialle è sempre stato portato a sostegno del fatto che esse non sono formate d'acqua, per la ovvia ragione che le nubi terrestri fatte d'acqua sono bianche; Ross inizialmente ha suggerito che possono essere nubi di polvere gialla, come quelle che si osservano su Marte; da allora sono stati proposti molti altri materiali: polimeri, sali, mercurio allo stato liquido, composti del mercurio, idrocarburi, polimeri del sottossido di carbonio (C_3O_2), cloruro ferroso parzialmente idrato, acido cloridrico. Il candidato sul quale oggi ci si trova più d'accordo è l'acido solforico. Come l'acqua esso non serve a spiegare il colore giallo delle nubi, ma fornisce una spiegazione semplice a molte altre osservazioni così che la sua mancanza di colore non è sufficiente a scartarlo.

Dei materiali più strani proposti come costituenti delle nubi solo uno è stato osservato spettroscopicamente. Si tratta del cloruro di idrogeno che fu scoperto insieme al fluoruro di idrogeno da William S. Benedict dell'Università del Maryland negli spettri registrati dai Connes. Entrambi questi gas sono molto corrosivi: in presenza d'acqua danno luogo ad acido cloridrico e ad acido fluoridrico. La loro abbondanza è troppo bassa per pensare che siano i principali costituenti delle nubi, ma la loro stessa presenza nell'atmosfera ha destato sorpresa.

Acidi così forti non potrebbero sopravvivere a lungo nell'atmosfera terrestre perché reagendo con le rocce e altri materiali verrebbero presto neutralizzati. Il fatto che su Venere esistano ci porta a concludere che le condizioni del pianeta debbano essere drasticamente diverse da quelle terrestri. Una differenza cruciale riguarda la temperatura della superficie.

La temperatura degli strati alti dell'atmosfera di Venere può essere determinata da Terra con sufficiente precisione: si può rivelare l'emissione termica delle nubi alle lunghezze d'onda dell'infrarosso, oppure si può dedurre la temperatura dallo spettro d'assorbimento molecolare della luce solare riflessa. Entrambe le tecniche portano alla conclusione che la temperatura alla sommità delle nubi si aggira intorno ai 250 kelvin, cioè inferiore al punto di fusione del ghiaccio (273 kelvin).

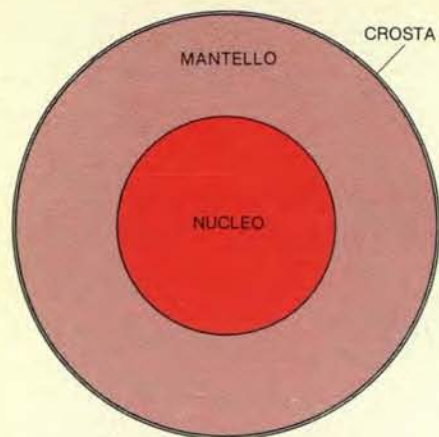
Tali valori, naturalmente, valgono soltanto per gli strati più alti dell'atmosfera; ora sappiamo che la superficie del pianeta è molto più calda. La temperatura delle regioni sotto le nubi fu per la prima volta determinata a metà degli anni cinquanta misurando l'emissione termica alle lunghezze d'onda radio. I primi risultati portarono a stimare la temperatura superficiale a circa 600 kelvin, un valore tanto elevato che molti astronomi lo considerarono errato. Forse a causa della diffusa credenza che Venere dovesse assomigliare alla Terra, questi insoliti valori non furono generalmente accettati finché *Mariner 5* e *Venera 4*, nel 1967, non registrarono l'andamento della temperatura dell'atmosfera. Dalle misurazioni dirette effettuate dalle più recenti sonde Venera, ora sappiamo che la temperatura superficiale di Venere si aggira intorno ai 750 kelvin.

Dai valori così differenti di temperatura tra la superficie e la sommità delle nubi si possono ricavare alcune proprietà fisiche dell'atmosfera; innanzitutto l'atmosfera deve essere spessa e quindi massiccia, perché una atmosfera sottile non potrebbe mantenere un gradiente di temperatura così elevato. Sulla Terra il gradiente massimo è di circa 10 kelvin per chilometro; se si dovesse formare un gradiente più elevato, sarebbe presto eliminato per effetto della convezione. Analoghi processi convettivi devono limitare il gradiente termico anche su Venere.

L'elevato valore della temperatura sulla superficie di Venere ha importanti riflessi sulla chimica dell'atmosfera. Come John S. Lewis del Massachusetts Institute of Technology ha dimostrato, piccole quantità di cloruro di idrogeno e di fluoruro di idrogeno possono venir emesse dalle rocce molto calde della superficie alla stessa stregua di quanto succede durante le eruzioni vulcaniche che avvengono sulla Terra.

Un certo numero di ipotesi sono implicite in questa affermazione: che la velocità delle reazioni chimiche sulla superficie sia elevata, che l'atmosfera e la superficie siano in equilibrio chimico e che gli effetti della circolazione atmosferica siano trascurabili. È certo che una temperatura elevata dovrebbe accelerare le reazioni chimiche, ma la velocità effettiva di reazione non è ancora stata misurata e le altre ipotesi non possono essere assolutamente provate. Nonostante queste incertezze, la conoscenza che si ha dell'ambiente termico di Venere fornisce un elenco di probabili molecole da ricercare nella sua atmosfera.

Gli spettri di assorbimento dell'atmosfera contengono numerose righe associate all'anidride carbonica. I due spettri sono stati presi vicino alla congiunzione superiore (*in alto*) e vicino a quella inferiore (*in basso*). Gli schemi a destra rappresentano la dimensione apparente del pianeta in ciascuna delle due fasi; la linea verticale sta a indicare la posizione della fenditura dello spettrografo rispetto al disco del pianeta. Alcune righe di assorbimento fanno parte dello spettro solare, ma tutte le altre sono identificabili con righe di assorbimento della luce solare da parte di molecole di anidride carbonica, che costituisce circa il 97 per cento dell'atmosfera di Venere. Questi spettri coprono soltanto una banda ristretta nella regione del vicino infrarosso. Esistono molte altre righe dell'anidride carbonica in altre parti dello spettro, tanto che Venere rappresenta senz'altro la migliore sorgente di spettri dell'anidride carbonica.

La conoscenza della temperatura e di altre proprietà fisiche dell'atmosfera può essere utile anche per risalire all'identificazione degli elementi costitutivi delle nubi. Una delle tecniche più efficaci per analizzare le particelle delle

Si suppone che la parte interna di Venere sia molto simile a quella della Terra. Se i due pianeti hanno avuto origine nella stessa regione del sistema solare in formazione, la composizione dei loro elementi deve essere simile e, poiché la massa e le dimensioni dei due pianeti sono quasi le stesse, dovrebbero esserlo anche le rispettive strutture interne. Così si pensa che Venere sia costituita da un nucleo di materiale allo stato fuso, da un mantello e da una crosta rocciosa di cui non si conoscono i rispettivi spessori, ma si hanno ragioni per supporre che il nucleo di Venere sia sostanzialmente più piccolo di quello terrestre. L'ipotesi che l'interno di Venere debba assomigliare a quello della Terra si fonda per ora su una misura, fatta da *Venera 8*, che indica che la radioattività delle rocce venusiane è simile a quella dei graniti terrestri. D'altra parte Venere è molto più povera d'acqua della Terra e apparentemente non è dotata di un campo magnetico, cosa non sorprendente data la lentezza della sua rotazione.

nubi è lo studio della polarizzazione della luce solare riflessa dalle nubi stesse. La polarizzazione fu per la prima volta osservata dall'astronomo francese Bernard Lyot negli anni venti; più recentemente studi analoghi sono stati compiuti da Audouin Dollfus in Francia e da Tom Gehrels e D.L. Coffeen dell'Università dell'Arizona. Per via teorica J. E. Hansen e i suoi collaboratori del Goddard Institute for Space Studies di New York hanno dimostrato che la polarizzazione può essere spiegata se le particelle che costituiscono le nubi sono sferiche, con un raggio di circa un micrometro, se le loro dimensioni non sono molto dissimili, se il loro indice di rifrazione per la luce verde è di circa 1,44 e se l'indice di rifrazione varia in funzione della lunghezza d'onda nel modo usuale.

Questa lista di requisiti impone severe restrizioni alla scelta dei costituenti delle nubi e inizialmente riuscì a eliminare tutti i possibili candidati. La forma sferica delle particelle implica che esse siano gocce di liquido e non cristalli solidi. L'acqua è esclusa perché il suo indice di rifrazione (1,33) è troppo basso, e anche perché gelerebbe alla temperatura della sommità delle nubi e quindi non potrebbe avere una forma sferica. Per venire incontro all'ipotesi di Hansen ci fu il tentativo di proporre gocce di acido cloridrico, ma risultò impossibile ottenere un indice di rifrazione abbastanza elevato nelle condizioni che si incontrano alla sommità delle nubi. La gran parte delle altre sostanze inorganiche fu scartata perché il loro indice di rifrazione è troppo elevato.

L'acido solforico fu proposto come candidato indipendentemente e quasi simultaneamente da Godfrey Sill dell'Università dell'Arizona e dagli autori di questo articolo e più tardi da Ronald G. Prinn del MIT. Prinn si accorse che avrebbe potuto prevedere la presenza di acido solforico nelle nubi parecchi anni prima, quando aveva scoperto una catena di reazioni fotochimiche che culminavano con formazione di anidride solforica (SO_3). Siccome l'anidride solforica non era stata osservata nell'atmosfera di Venere, egli suppose che venisse distrutta nel momento stesso in cui veniva prodotta. Effettivamente tutta l'anidride solforica che si potrebbe formare nelle regioni più fredde dell'atmosfera si combinerebbe immediatamente con il vapore acqueo per formare una nube di acido solforico.

L'ipotesi dell'acido solforico rende comprensibili molte delle osservazioni che avevano fatto ammattire negli ultimi 15 anni gli studiosi di Venere. Una soluzione acquosa contenente più del 70 per cento di acido solforico ha un indice di rifrazione che si adatta alle osservazioni e rimane liquida anche a 250 kelvin. L'insuccesso dei metodi spettroscopici nel rivelare composti gassosi dello zolfo (come l'SO_3) nell'atmosfera è facilmente spiegabile perché l'acido solforico freddo ha una tensione di vapore trascurabile come in genere le molecole contenenti zolfo. Infine l'acido solforico spiega il perché di molte delle stranezze dello spettro di assorbimento di Venere che avevano destato perplessità. Le soluzioni acquose dell'acido si dissociano quasi completamente in H_3O^+ e in HSO_4^- lasciando ben poche molecole d'acqua disponibili, e quindi l'atmosfera dovrebbe essere molto secca. Inoltre, lo ione H_3O^+ assorbe molta radiazione tra i tre e i quattro micrometri e lo ione HSO_4^- assorbe a 11,2 micrometri chiarendo il perché delle anomalie dello spettro di assorbimento scoperte da Sinton, Moroz e Strong.

Se ammettiamo qualche tolleranza per gli altri acidi disciolti nelle gocce, una concentrazione dell'80 per cento circa (in peso) sembra accordarsi con i dati. Una tale soluzione contiene da una a due molecole d'acqua per ogni molecola di acido solforico. Ci sono buone ragioni per supporre che il numero di gocce per unità di volume cresca gradualmente verso il basso dell'atmosfera e che, qualche decina di chilometri più in basso della sommità delle nubi, le gocce siano abbastanza vicine tra di loro per riunirsi insieme. Dove l'atmosfera raggiunge la pressione di qualche atmosfera si può formare una pioggia di acido solforico. Sia *Mariner 5* sia *Mariner 10* hanno rivelato la presenza a una quota inferiore a 50 chilometri di una sostanza in grado di assorbire microonde, e osservazioni nel campo delle microonde effettuate da terra da Michael A. Janssen del Jet Propulsion Laboratory del California Institute of Technology mostrano che l'assorbitore consiste di particelle, e non di molecole allo stato gassoso. Soluzioni di acido solforico possiedono un'alta conduttività elettrica e perciò potrebbero produrre questi effetti se le gocce presenti sono abbastanza grandi.

Quando una goccia di acido solforico cade attraverso aria più calda, l'acqua evapora dalla sua superficie e l'acido diventa più concentrato. A causa della forte affinità dell'acido solforico con l'acqua, soluzioni concentrate bollono solo ad alte temperature, più elevate del punto di ebollizione dell'acido puro. La soluzione avente il più elevato punto di ebollizione contiene più del 98 per cento di acido e ha ugual tensione di vapore per l'acido e per l'acqua. Sembra che *Venera 8* abbia effettuato misure alla base delle nubi a una quota vicina ai 35 chilometri dove la temperatura si aggira intorno ai 400 kelvin. Se la quota è stata stimata esattamente, allora si deve concludere che alla base delle nubi il vapore d'acqua e l'acido solforico debbano entrambi avere una abbondanza di circa cento parti per milione.

Una pioggia di acido solforico caldo e concentrato è di per se stessa una prospettiva tutt'altro che promettente per chi progetta sonde spaziali, ma c'è di peggio. La piccola percentuale di fluoruro di idrogeno contenuta nell'atmosfera di Venere può entrare in reazione con l'acido solforico per produrre acido fluorosolforico (HSO_3F) che è il più forte degli acidi inorganici: attacca la maggior parte dei materiali comuni ed è in grado di sciogliere lo zolfo, il mercurio, il piombo, lo stagno e la maggior parte delle rocce. La pioggia che cade su Venere potrebbe essere il fluido più corrosivo di tutto il sistema solare.

Anche se con l'acido solforico si possono spiegare con successo gran parte delle proprietà delle nubi venusiane, ri-

In questa serie di fotografie all'ultravioletto prese dalla sonda *Mariner 10* è visibile il moto apparente delle nubi più alte dell'atmosfera di Venere. Sono state scattate il 7 febbraio 1974 con un intervallo di sette ore l'una dall'altra, due giorni dopo che la sonda aveva raggiunto la minima distanza dal pianeta. La macchia più scura evidente al centro del disco del pianeta nella prima foto si sposta rapidamente verso sinistra e nella terza fotografia si trova già vicina al bordo. Moti analoghi sono stati osservati anche da Terra e sembrano implicare una rotazione retrograda della atmosfera con un periodo di quattro giorni all'incirca. Dal momento che si sa che la rotazione del pianeta è molto più lenta, si pensa che il moto dell'atmosfera sia dovuto alla presenza di venti di eccezionale potenza che interessano vaste superfici.

mane almeno un'altra caratteristica di cui non ci si riesce a rendere conto: il colore giallo del pianeta. Il colore deve essere prodotto da qualche sostanza che assorbe le lunghezze d'onda più corte, soprattutto il blu e l'ultravioletto. L'acido solforico non è in grado di farlo, ma nessuna altra sostanza ha convinto gli astronomi.

Il problema è reso complesso dalla varietà di composti dell'idrogeno, dell'ossigeno, dello zolfo, del cloro e del fluoro, che sappiamo con sicurezza che sono presenti su questo pianeta. Forse qualche composto di questi elementi è in grado di asorbire le radiazioni blu e ultraviolette, o forse è in grado di farlo lo zolfo allo stato elementare.

Qualunque sia la loro composizione, le nubi hanno un'influenza fondamentale sul clima e la meteorologia di Venere. Le nubi impediscono il passaggio sia alla luce solare incidente sia alla radiazione termica uscente. La luce solare incidente è però in gran parte diffusa, mentre il calore uscente – alle frequenze dell'infrarosso – è assorbito fortemente dall'acido solforico. Le nubi sono quindi molto più efficienti nell'impedire che il calore esca che non nell'impedirne l'entrata e così contribuiscono all'« effetto serra » cui si pensa di poter attribuire l'elevata temperatura del pianeta.

Misurazioni effettuate da *Venera 8* hanno dimostrato che solo qualcosa come l'un per cento della luce solare incidente raggiunge la superficie di Venere, che risulterebbe quindi buia come la Terra in una grigia giornata piovosa. Sotto le nubi, l'atmosfera di anidride carbonica è quasi completamente opaca alle lunghezze d'onda infrarosse, così che il calore assorbito è intrappolato in superficie. Poiché il calore non può sfuggire per radiazione diretta, deve essere trasportato per convezione fino alla sommità delle nubi da dove può essere irradiato nello spazio. I profili di temperatura registrati dalle sonde che hanno penetrato l'atmosfera venusiana mostrano la presenza di un gradiente termico convettivo dalla superficie alla sommità delle nubi.

Alla sommità delle nubi il 20 per cento circa della luce solare incidente viene assorbita, metà nelle bande dell'anidride carbonica che cadono nel vicino infrarosso, metà dalla sostanza non identificata che assorbe le radiazioni ultraviolette. Poiché la maggior parte dell'energia che raggiunge il pianeta avviene a quella quota, è lì che la meteorologia del pianeta deve essere più critica. Inoltre, poiché l'assorbimento nell'ultravioletto è uno dei meccanismi principali per riscaldare l'atmosfera, le variazioni che si riscontrano ogni quattro giorni nelle caratteristiche delle nubi riprese all'ultravioletto potrebbero riflettere una analoga periodicità nella meteorologia del pianeta.

Abbiamo determinato la quantità di gas presente sopra le nubi e ne abbiamo misurato la temperatura cercando le possibili correlazioni tra le variazioni di questi parametri e l'apparente periodo di rotazione delle caratteristiche ultraviolette; abbiamo scoperto che la quantità di gas assorbito varia durante il ciclo di quattro giorni, ma che, a ogni dato giorno è quasi uniformemente distribuita su tutto il pianeta, senza mostrare alcuna correlazione con l'andamento delle zone chiare e scure che si vedono nelle nubi fotografate all'ultravioletto. Inoltre le variazioni di temperatura non sembrano essere correlate né all'altezza della sommità delle nubi, né allo spostamento delle caratteristiche ultraviolette. La mancanza di ogni correlazione è incomprensibile: le caratteristiche ultraviolette sembrano ombre dipinte su un mondo privo di qualsiasi caratteristica.

La superficie e l'interno di Venere ci rimangono ignote, ma siamo ugualmente in grado di dire qualcosa sulla loro natura. Mappe radar hanno permesso una prima ricostruzione della topografia del pianeta e alcune osservazioni effettuate dai satelliti hanno fornito i dati fondamentali per abbozzare alcune teorie sulla sua costituzione interna.

Le mappe radar del pianeta non possono essere ottenute con la tecnica usuale della scansione che si impiega nelle analoghe osservazioni terrestri. A causa, infatti, delle ridotte dimensioni angolari del pianeta, il fascio di una singola antenna radar copre l'intero disco del pianeta così che l'unico metodo per ricostruire la posizione della superficie dalla quale si riceve un segnale riflesso consiste nell'analisi del ritardo dell'eco e del suo spostamento Doppler. I segnali che sono riflessi dai bordi del disco arrivano con un certo ritardo su quelli che giungono dal suo centro e il valore dello spostamento Doppler dovuto alla rotazione del pianeta dipende sia dalla latitudine sia dalla longitudine. Collegando insieme due o più antenne, in modo che possano funzionare come un interferometro, si può ottenere la ricostruzione di una parte del disco del pianeta.

Molte zone della superficie sono già state definite con questo metodo come rugose, lisce, alte o basse. Nelle mappe più recenti sono visibili alcune strutture a forma di crateri (*si veda l'illustrazione a pagina 52*). Per lo più Venere sembra, però, un pianeta più liscio della Luna, di Marte o di Mercurio. Sembra anche particolarmente piatto presentando ben pochi rilievi più alti di un chilometro o poco più. La scarsità di piccoli crateri può essere attribuita alla densa atmosfera; meteoriti di un diametro inferiore a cento metri non possono penetrarla. Anche la piattezza del terreno può essere dovuta ai fenomeni atmosferici: in una atmosfera così calda e densa fenomeni corrosivi possono rapidamente far sparire ogni rilievo. Questa ipotesi richiede però che i venti superficiali siano abbastanza forti da erodere il terreno; alle velocità riscontrate non si direbbe che questi venti siano in grado di sollevare e trasportare polvere, a meno che non si tenga conto della densità dell'atmosfera.

La maggior parte dei modelli della struttura interna di Venere partono dall'ipotesi che il pianeta sia fondamentalmente analogo alla Terra, cioè che abbia un nucleo di materiale allo stato fuso, un mantello e una crosta rocciosa. C'è un argomento cosmologico a favore di questa ipotesi: se due pianeti si sono condensati nella stessa regione della nebulosa solare primordiale, dovrebbero possedere all'incirca la stessa composizione. A favore di questo argomento sta anche il fatto che la Terra e Venere hanno pressappoco la stessa dimensione e la stessa densità.

Una obiezione che si può fare è che su Venere manca completamente l'acqua; un'altra è che apparentemente manca anche un campo magnetico. Le misure effettuate da *Venera 4* dimostrano che se ce n'è uno, deve in ogni modo essere più debole di quello terrestre di un fattore di almeno 10 000. D'altra parte l'assenza di campo magnetico può essere interpretata anche senza rimettere in discussione la teoria della formazione dei pianeti. Si pensa infatti che il campo magnetico terrestre sia una conseguenza della rotazione del pianeta sul moto all'interno del nucleo fuso, e se questa è l'interpretazione esatta, allora si spiega perché Venere che ruota così lentamente non abbia un campo magnetico.

Informazioni più dettagliate sulla struttura del corpo solido costituente il pianeta si potrebbero ricavare dall'analisi diretta delle rocce della crosta. Se Venere si è formata nello stesso modo della Terra e se la sua atmosfera è un prodotto dei gas liberati dall'interno del pianeta, allora le sue rocce devono essere certamente differenziate; se invece la sua evoluzione non è stata così rapida come quella terrestre, allora le rocce devono assomigliare di più ai basalti lunari. Fino all'anno scorso l'unica misura di questo tipo degna di rilievo è stata effettuata dalla sonda *Venera 8* che ha misurato la radioattività del suolo venusiano dimostrando che è comparabile a quella dei graniti terrestri. Questo risultato alimenta l'ipotesi di una evoluzione della crosta analoga a quella della Terra, ma non sarebbe prudente tirare conclusioni definitive fino a quando nuovi dati trasmessi dalle due sonde russe che, lanciate in giugno, sono giunte a destinazione nell'ottobre scorso, non saranno stati elaborati.

Qualsiasi ipotesi sull'evoluzione di Venere deve tener conto innanzi tutto della sua atmosfera: perché questa dovrebbe essere 90 volte più massiccia di quella terrestre? Abbiamo una possibile spiegazione di questo fenomeno la quale, però conduce a nuovi e forse più intricati enigmi.

La quantità di anidride carbonica presente su Venere è circa identica a quela esistente sulla Terra, con la differenza che sul nostro pianeta questa è in gran parte contenuta nelle rocce sotto forma di carbonati. È soltanto perché la temperatura superficiale di Venere è così elevata che lassù i gas rimangono liberi nell'atmosfera. D'altra parte questa non è una spiegazione molto soddisfacente perché è proprio la presenza di una atmosfera così massiccia che consente di avere temperature tanto elevate.

Il problema è allora quello di spiegare come Venere abbia acquisito questa atmosfera più che quello di capire come riesca a conservarla. Un'idea largamente accettata è che tutto dipenda dall'effetto serra. Si suppone che Venere fosse all'origine un pianeta più simile alla Terra, ossia più freddo e con una atmosfera più sottile e che soltanto successivamente il calore solare intrappolato dall'atmosfera ne abbia innalzato la temperatura superficiale. Può darsi che, essendo Venere più vicina al Sole di quanto non lo sia la Terra, la temperatura abbia superato il punto di ebollizione dell'acqua e di conseguenza che la rilevante quantità di vapore acqueo aggiuntosi all'atmosfera l'abbia resa ancora più opaca alla radiazione infrarossa e perciò abbia prodotto un ulteriore innalzamento della temperatura. Alla fine è possibile che la superficie sia diventata abbastanza calda per strappare l'anidride carbonica dai carbonati delle rocce.

Fra qualche miliardo di anni il Sole sarà più brillante di quanto non lo sia ora e anche la Terra potrà avere una atmosfera così massiccia e una temperatura superficiale così elevata come quella che Venere ha ora. Almeno nella fase iniziale del processo, però, quando gli oceani entreranno in ebollizione,

l'atmosfera terrestre sarà ben differente dall'attuale atmosefra venusiana. In particolare conterrà un'enorme quantità d'acqua dal momento che la massa d'acqua contenuta negli oceani terrestri supera di molto la quantità di anidride carbonica contenuta nelle sue rocce, mentre, al contrario, Venere è abbastanza secca.

Se si parte dall'ipotesi che Venere abbia avuto la stessa quantità d'acqua che la Terra ha ora, si deve spiegare perché ne resti soltanto una parte su un milione. C'è un noto meccanismo mediante il quale si spiega come un pianeta sul quale l'acqua abbonda ne possa perdere una gran parte: il vapore acqueo che si trova nell'alta atmosfera potrebbe essere dissociato dalla radiazione ultravioletta e l'idrogeno potrebbe disperdersi nello spazio sia per pura agitazione termica sia per l'influenza del vento solare. Questo processo, d'altra parte, non è così efficiente da produrre un'atmosfera secca come quella di Venere. Dell'acqua che Venere ha oggi, solo una piccolissima parte raggiunge gli strati alti dell'atmosfera, e quindi, non è dissociata; al tasso attuale, Venere non avrebbe perso una quantità significativa d'acqua in tutta la storia del sistema solare.

Alternativamente, si potrebbe supporre che all'inizio Venere fosse completamente secca e che la piccola quantità d'acqua che ora è presente abbia avuto origine dall'idrogeno del vento solare, che penetra direttamente nell'atmosfera per l'assenza di campo magnetico. Questa ipotesi però risolve un problema creandone un altro di natura cosmologica: se Venere e la Terra si sono formati nello stesso momento come è possibile che il primo pianeta abbia così poca acqua rispetto al secondo?

Forse c'è una possibilità per dirimere la questione a favore di una delle due ipotesi: se Venere un tempo conteneva acqua che è andata poi perdendo nel corso del tempo, quella poca che rimane dovrebbe essere ricca di deuterio poiché questo isotopo pesante dell'idrogeno è meno facile a perdersi. All'opposto, l'idrogeno contenuto nel vento solare è privo di deuterio perché tale isotopo viene consumato prevalentemente nelle reazioni nucleari del Sole. Putroppo fino a ora non è stato ancora possibile determinare il rapporto tra deuterio e idrogeno su Venere. In questo campo come in altri, anzi, bisogna dire che gli studi più recenti condotti su Venere hanno sollevato più questioni di quante non ne abbiano risolte. Con la sua spessa atmosfera oscura e con la sua piatta superficie, Venere continua a essere per il momento una sfera di cristallo immersa nelle nubi.

La Terra

La caratteristica più saliente del nostro pianeta è costituita dalla dinamica attività dell'atmosfera e della crosta, entrambe profondamente modificate dall'evoluzione degli organismi viventi

di Raymond Siever

Gli astronauti imbarcati sulle navicelle Apollo in viaggio verso la Luna hanno raccontato che la Terra, con le sue acque blu e le sue nubi bianche, era certamente l'oggetto di gran lunga più invitante che essi potevano vedere nel cielo. La loro affermazione è ben comprensibile: essi sapevano, per averlo osservato dall'interno, che cosa è il nostro pianeta; essi quindi potevano tradurre l'aspetto di nubi, oceani e continenti in elementi dettati dall'esperienza quotidiana, e cioè, per esempio, in una dolce brezza che soffia al di sopra delle onde verso una spiaggia assolata.

Probabilmente ciò che della nostra Terra piace di più alla gente, anche se non lo sa tradurre in parole, è il suo caratteristico e costante movimento interno. Il silenzio è una vera rarità sulla Terra perché sul nostro pianeta, poco o tanto, ogni cosa si muove: è il movimento che va dal continuo rotolare dei granuli di sabbia in una duna a quello dei batteri e di tutte le altre forme di vita, fino ad arrivare a quello poderoso dell'intera Terra che vibra durante e dopo il terremoto.

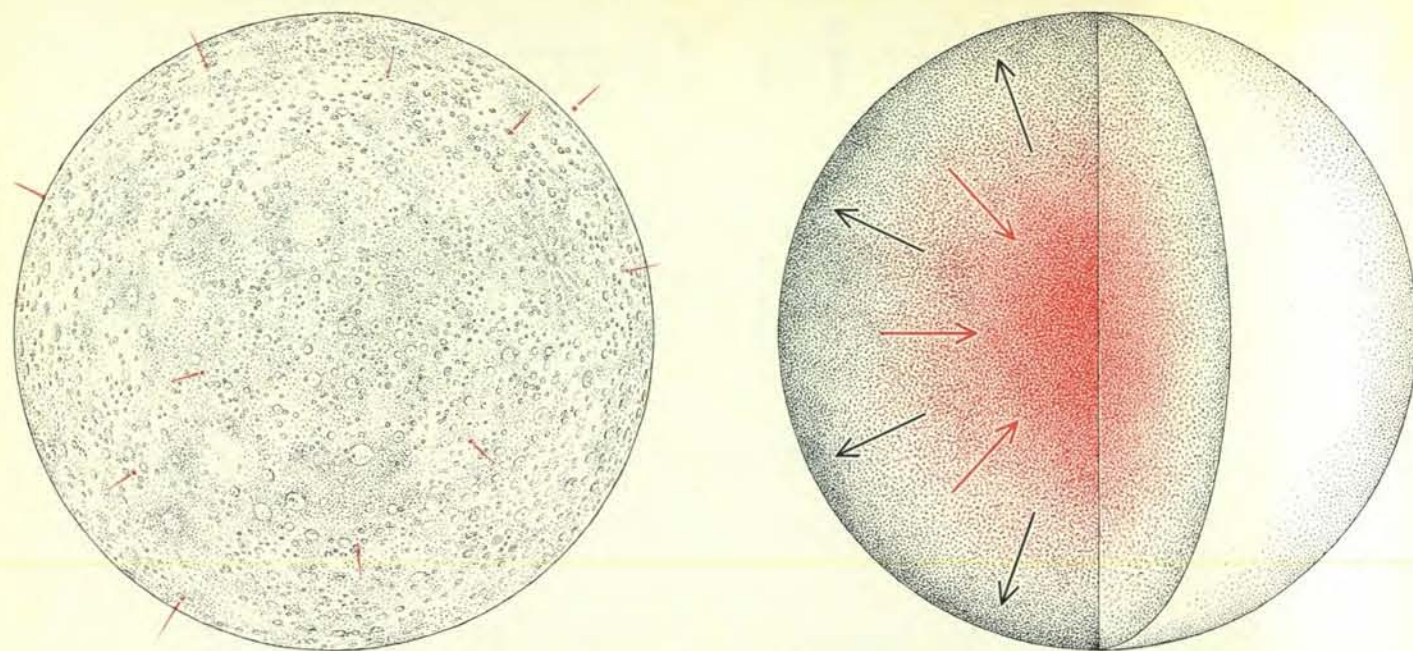
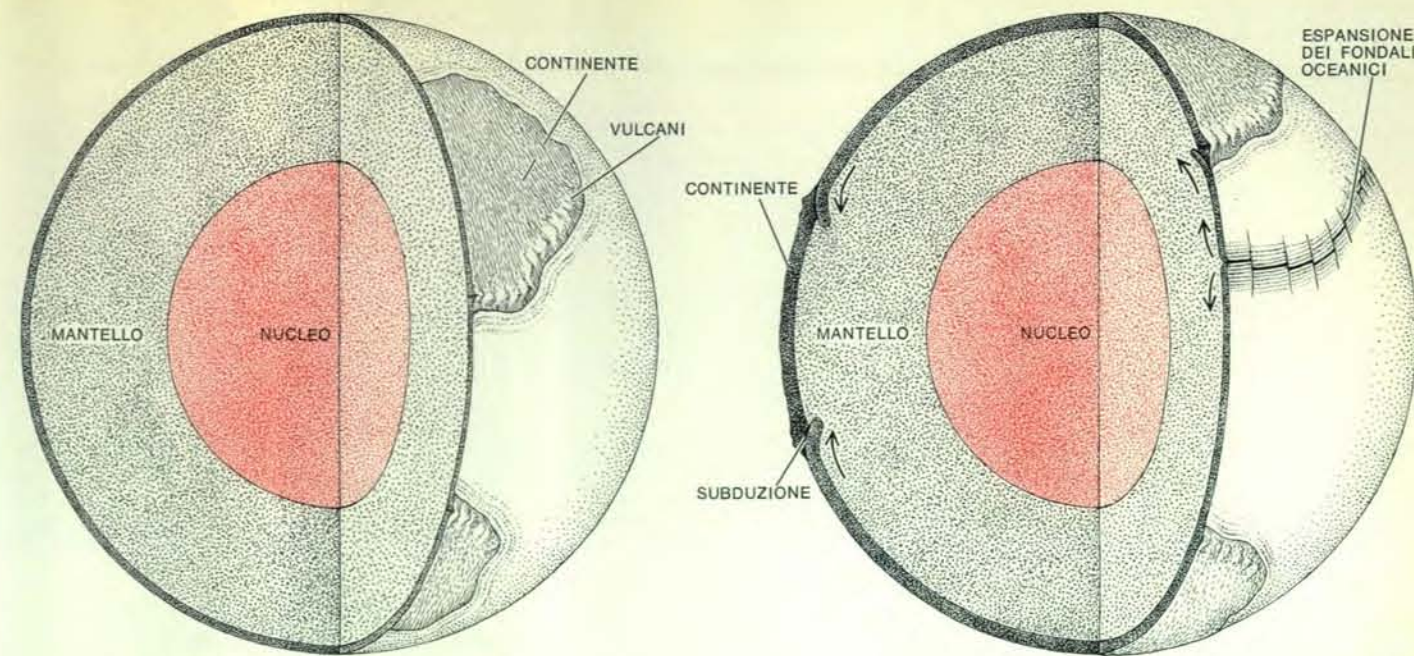
Questo è un pianeta vivo. Di fatto esso lo è da 4,6 miliardi di anni e non mostra di volersi calmare. Da quando si sono formati, l'atmosfera, gli oceani, la sottile crosta e l'interno del pianeta, sono in movimento. La vita è stata una parte fondamentale della superficie per almeno quattro quinti della storia del pianeta.

In conseguenza della sua attività stazionaria per lunghi periodi di tempo, la Terra si è evoluta passando attraverso una serie di stadi abbastanza diversi, ma mantenendo per tutto il tempo uno stato di equilibrio dinamico. L'equilibrio comporta uno scambio di materia ed energia tra l'interno, la superficie, l'atmosfera e gli oceani. Esso comporta anche la ripartizione della radiazione solare con gli altri membri del sistema solare. Gli studi geologici, insieme a quelli geochimici, geofisici e paleontologici, hanno chiarito come l'involucro più esterno della Terra è andato evolvendosi. La conoscenza di questi eventi, accostata a una solida teoria relativa alla composizione dell'interno della Terra e ad alcune ipotesi relative ai possibili movimenti interni, fornisce i mezzi necessari per costruire una teoria completa, un vero modello, dell'evoluzione terrestre.

L'articolo di A.G.W. Cameron (in questo fascicolo a pagina 20), descrive l'origine della Terra e degli altri pianeti attraverso la condensazione della materia contenuta in particolari regioni della nebulosa solare. La composizione originaria della nebulosa e le sue evoluzioni nel tempo sono dedotte dalla composizione delle rocce terrestri, di quelle lunari, delle meteoriti e delle atmosfere della Terra, di Marte, di Venere e di Giove.

La teoria dello sviluppo della Terra oggi preferita dagli studiosi inizia dalla condensazione graduale e dall'aggregazione di un pianeta solido a partire da enormi quantità di piccole particelle ricavate dalla nebulosa a forma di disco che ha dato origine all'attuale sistema solare. A mano a mano che il pianeta si sviluppava, ha cominciato a riscaldarsi per l'effetto combinato della contrazione gravitazionale della sua massa, dell'impatto di meteoriti e del calore liberato dal decadimento radioattivo di uranio, torio e potassio (il potassio normalmente non è considerato un elemento radioattivo; ma lo 0,01 per cento della massa di questo elemento presente sulla Terra è costituito da un isotopo radioattivo, il potassio 40). Alla fine, l'interno del pianeta si è fuso. La conseguenza di questo evento è stata quella che viene chiamata la catastrofe del ferro, una rivoluzione che ha comportato la riorganizzazione dell'intera struttura del pianeta: gocce di ferro fuso insieme con altri elementi pesanti sono sprofondate verso il centro della Terra, dove si è formato un nucleo che è rimasto in gran parte fuso fino al giorno d'oggi.

All'atto in cui i metalli pesanti sono sprofondati verso il centro, quelli più leggeri si sono avviati verso la superficie e cioè verso quegli strati più esterni che oggi chiamiamo mantello superiore e crosta. In questa risalita gli elementi più leggeri come alluminio, silicio, sodio e potassio, erano accompagnati dagli elementi pesanti radioattivi, uranio e torio. La spiegazione della risalita di questi elementi pesanti si trova nel modo stesso in cui uranio e torio formano composti cristallini. La forma e le affinità chimiche dei loro atomi impediscono loro di rimanere all'interno di strutture dense e

Il cratere, visibile in una fotografia da satellite sulla pagina a fronte, si trova sullo scudo canadese e si è formato più di 200 milioni di anni fa per l'impatto di una grande meteorite. La cicatrice di questo impatto è costituita da una struttura a forma di anello con un diametro di circa 60 chilometri ed è riempita dal lago Manicouagan, uno dei più grandi del Quebec nord-orientale. L'accumulo di neve sul ghiaccio di cui è ricoperto il lago esalta la visibilità di questa formazione. La roccia in cui si è formata questa struttura è una anortosite precambriana che è stata fusa e interessata da sforzi connessi con l'impatto; al centro, rimane un picco di rocce. Diversamente dai crateri di impatto presenti su Mercurio e sulla Luna, la maggior parte di quelli terrestri sono stati da lungo tempo cancellati o sepolti da processi erosionali o tettonici. La maggior parte dello scudo canadese, tuttavia, si è preservata al di sotto di strati sedimentari ed è tornata in superficie a causa dell'azione dei ghiacciai che in questa zona hanno spazzato via uno strato sedimentario spesso più di un centinaio di metri.

Quattro stadi dell'evoluzione della Terra. La storia comincia con la sfera qui sopra, sviluppatasi per aggregazione nei primi milioni di anni successivi alla condensazione dalla nebulosa solare. Il giovane pianeta è bucherellato dalla caduta di milioni di piccoli corpi planetesimali; la sua atmosfera è ricca di idrogeno e gas nobili. Più tardi (*secondo schema*), quando ormai erano passate alcune decine di milioni di anni, una combinazione di diversi processi, quali la compressione gravitazionale, il decadimento radioattivo e il riscaldamento da impatto, ha determinato la fusione e la differenziazione della Terra: un nucleo pesante e i materiali del mantello sono scesi verso l'interno mentre i materiali crostali più leggeri sono risaliti verso la superficie. Il vento solare ha spazzato via l'atmosfera primitiva che è stata sostituita da un'atmosfera ricca di metano, ammoniaca e acqua. Nell'Archeano (*terzo schema*), tra 3,7 e 2,2 miliardi di anni fa, si è verificato un sensibile raffreddamento. All'atto in cui l'acqua atmosferica si condensa, compaiono gli oceani; i primi continenti affiorano mentre l'attività vulcanica è intensa. Le reazioni chimiche tra acqua, gas e materiali crostali danno luogo a sedimenti e soluzioni. Nell'era proterozoica (*quarto schema*), seguita all'Archeano, si cominciano a trovare numerose tracce di piante e animali. Il Proterozoico termina 570 milioni di anni fa con l'inizio del Paleozoico, segnato da una ricchissima documentazione paleontologica. Durante il Proterozoico, durato 1,5 miliardi di anni, è continuato il raffreddamento e l'ispessimento della crosta. Le zolle crostali hanno incominciato a migrare e si sono instaurati processi come l'espansione dei fondali oceanici e la subduzione della litosfera attivi anche ora.

compatte che sono stabili alle pressioni elevate caratteristiche delle maggiori profondità all'interno della Terra. Dunque gli atomi di uranio e torio sono stati spremuti verso l'alto e obbligati a migrare verso le regioni del mantello superiore e della crosta dove essi hanno potuto accomodarsi facilmente nelle strutture cristalline più aperte dei silicati e degli ossidi presenti nelle rocce crostali.

All'atto in cui la Terra si è differenziata in un nucleo, un mantello e una crosta, anche il materiale in cima a questa pila si è differenziato in frazioni diverse. Le parti basali della crosta sono composte infatti di rocce gabbriche e basaltiche e cioè di rocce scure, contenenti calcio, magnesio e composti di tipo prevalentemente silicatico, ricchi di ferro. Questi sono derivati dalla fusione parziale e dalla differenziazione dei materiali più densi del mantello superiore. Il basalto e il gabbro si sono a loro volta differenziati per cristallizzazione frazionata e fusione parziale in modo tale che i fluidi più leggeri sono stati spinti in alto attraverso la crosta. Negli strati superficiali della crosta e alla superficie stessa, essi si sono solidificati per formare le rocce eruttive più leggere, come il granito, che sono particolarmente ricche in silicio, alluminio e potassio.

Come la superficie della Terra si è raffreddata e si sono formati gli oceani per condensazione dell'acqua, i meccanismi dell'erosione da parte del vento e dell'acqua hanno cominciato ad agire in modo non molto diverso da quello odierno. L'acqua liquida è diventata il veicolo fondamentale di trasporto e ridistribuzione dei detriti strappati alle montagne in via di erosione. I sistemi fluviali della superficie sono le tracce visibili di questa rete che trasposta materiale eroso verso gli oceani: qui esso si accumula in grandi depositi di sedimenti lungo le piattaforme e i rialzi continentali. Il resto dei sedimenti viene sparso sotto forma di strati sottili nelle grandi profondità oceaniche attraverso i meccanismi della deposizione pelagica e quelli più violenti delle correnti di torbidità.

Un certo numero di geochimici e geofisici ha individuato una catena di eventi leggermente diversa che avrebbe portato alla primitiva aggregazione della Terra dalla nebulosa solare in via di condensazione. Secondo le loro opinioni, la Terra e gli altri pianeti sono i prodotti di una condensazione graduale della nebulosa solare durante la quale alcuni degli elementi pesanti, soprattutto il ferro, sono cristallizzati per primi, mentre le frazioni più leggere della nebulosa si trovavano ancora sotto forma gassosa. In questo processo il nucleo del pianeta in via di aggregazione sarebbe stato subito ricco di ferro mentre attorno a esso soltanto in seguito si sarebbero aggiunte le frazioni più leggere, secondo una successione corrispondente più o meno al loro ordine di cristallizzazione, dalla nebulosa solare stessa.

Quale che sia il meccanismo di aggregazione, la storia della evoluzione successiva del pianeta (e cioè quella che si è verificata dopo la fine del primo miliardo di anni), è largamente testimoniata dagli eventi registrati nelle rocce della crosta terrestre. Esse rappresentano l'«orologio geologico» che ha cominciato a battere agli inizi del Precambriano. Le rocce più antiche ora note sono costituite da una serie di rocce sedimentarie e vulcaniche metamorfosate, le quali dimostrano, in base al contenuto di elementi radioattivi, di avere un'età che si aggira attorno ai 3,7 miliardi di anni. Esse sono molto più antiche della maggior parte delle rocce più antiche appartenenti a quell'intervallo di tempo che i geologi chiamano Archeano. Infatti queste ultime sono generalmente più vecchie di 2,2-2,8 miliardi di anni: l'età che determina il confine con ere più recenti varia nelle diverse parti del mondo.

La maggior parte della testimonianza portata da queste rocce è frammentaria; è tangibile, tuttavia, e non è più possibile effettuare una ricostruzione di questo periodo basandosi esclusivamente su teorie plausibili.

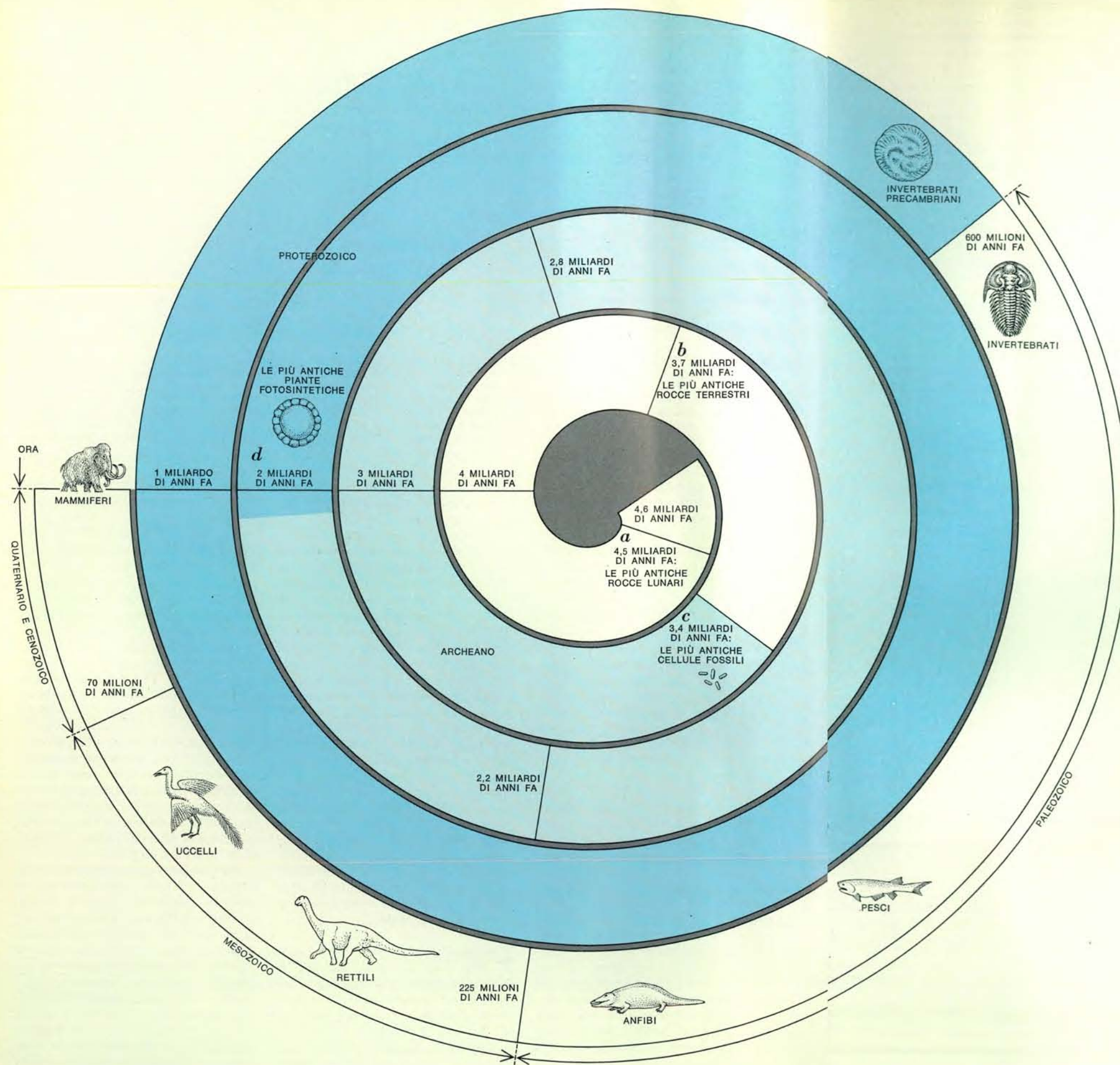
Le rocce archeane sembrano essere un pochino diverse da quelle di tutte le ere seguenti nel senso che alcuni tipi sono abbondanti a scapito della maggior parte degli altri tipi di rocce che invece si trovano nei periodi successivi. Le serie rocciose archeane tendono a essere dominate da basalti e andesite che sono rocce vulcaniche ricche di ferro e magnesio, mentre sono povere di sodio e potassio e hanno un contenuto abbastanza basso di silice. Le arenarie e le argilliti dell'Archeano sono derivate dall'alterazione e dal rimaneggiamento di queste rocce vulcaniche. Grandi ammassi di granito (una roccia più ricca di alcali e silice) mancano del tutto. Questa composizione diversa da quella delle rocce dei periodi successivi indica che la spremitura di rocce granitiche per cristallizzazione frazionata e fusione parziale di rocce meno silicee non era così avanzata e profonda come lo è diventata più tardi.

Le rocce archeane, inoltre, suggeriscono che lo stile tettonico di quel tempo, e cioè l'attività orogenetica attraverso la quale veniva modellata la superficie, aveva un andamento diverso da quello odierno. L'attuale teoria della tettonica a zolle individua grandi zolle di litosfera (che comprendono la crosta e una parte del mantello superiore) che si muovono lateralmente al di sopra della astenosfera (uno strato caldo, plastico e forse parzialmente fuso del mantello). La forza motrice è un movimento del mantello anche se la sua natura precisa è incerta. L'attività geologica di terremoti, vulcanismo e orogenesi è concentrata ai margini delle zolle. La maggior parte dei geologi sospetta che l'Archeano sia stato un periodo in cui esisteva una crosta litosferica molto sottile, tormentata da un vulcanismo estremamente intenso e dal movimento continuo di un gran numero di piccole e sottili zolle con suture e cioè fasce di deformazione comprese tra l'una e l'altra.

Anche se l'Archeano è stato molto diverso da oggi, quanto a stile tettonico e a composizione media delle sue rocce vulcaniche, esso è stato identico invece per quanto riguarda tutti i processi essenziali di erosione e sedimentazione lungo la superficie. Come è stato osservato più di trent'anni fa da Francis J. Pettijohn della Johns Hopkins University che è stato uno dei primi a studiare le rocce sedimentarie precambriane nella regione del Lago Superiore, queste mostrano tutte le tracce di alterazione, di erosione meccanica, di trasporto attraverso i fiumi e di sedimentazione in regioni dove la crosta gradualmente sprofonda: fenomeni ben conosciuti anche oggi e che giustificano il grande spessore dei sedimenti che si trovano nelle formazioni rocciose di questo periodo. Guardando a queste arenarie, argilliti e conglomerati, è difficile notare alcuna differenza significativa tra esse e quelle più recenti: entrambe sono il risultato della cementazione di ciottoli, sabbia e fango.

L'erosione e l'alterazione chimica delle rocce sono oggi profondamente influenzate dalla presenza delle piante terrestri. È noto tuttavia che le piante terrestri superiori (vascolari) non si sono evolute fino a circa 2 miliardi di anni dopo la fine dell'Archeano e cioè in pieno Paleozoico. Forse prima che evolvessero le piante, esistevano forme di vita inferiori sulla Terra, così come certamente accadeva in mare.

Le prove di una vita algale nel tardo Precambriano sono state ottenute qualche anno fa quando il paleobotanico Elso S. Barghoorn dell'Università di Harvard, lavorando insieme con Stanley A. Tyler, un sedimentologo dell'Università del Wisconsin, scoprì resti microscopici di organismi algali nella formazione di Gunflint, una roccia sedimentaria densa costituita principalmente di silice. La formazione di Gunflint è stata datata in base al suo contenuto in elementi radioattivi e relativi prodotti di decadimento: essa risulta avere un'età di circa 2 miliardi di anni. Da allora, sono state ritrovate altre strutture organiche che assomigliano a resti di organismi persino in rocce più antiche. Le più antiche sono quelle della formazione di Fig Tree dello Swaziland in Africa che hanno un'età di circa 3,4 miliardi di anni.

Questo tipo di ricerca di prove dell'esistenza di antiche forme di vita è un processo laborioso e faticoso. È necessario difatti analizzare migliaia di campioni di rocce dai quali bisogna ricavare sezioni ultrasottili in modo tale da poter essere studiate col microscopio ottico e con quello elettronico. Anche se in rocce antiche, addirittura più antiche di quelle della formazione di Gunflint e di Fig Tree, sono stati trovati resti di carbonio organico, si può sempre ricorrere a un numero notevole di meccanismi chimici

che possono giustificarli. Le prove più recenti dell'esistenza di forme ben distinte di vita cellulare, però, sono difficili da confutare.

Come la vita è cominciata sulla Terra è invece un'altra storia: si tratta della ricostruzione di meccanismi chimici compatibili con il modello prescelto a rappresentare la natura chimica dell'ambiente superficiale primordiale. Si comincia con il convincersi che l'atmosfera archeana primordiale (nata dalla emissione di gas dall'interno del pianeta) era dominata dall'acqua, dal metano e dall'ammoniaca. L'ossigeno libero era assente, dato che esso è un tipico prodotto della vita e non può precederla. L'atmosfera poteva inoltre contenere quantità considerevoli di anidride carbonica.

L'esistenza e i caratteri di questa atmosfera sono collegati al fatto che la Terra è più piccola di Giove e più grande della Luna. Giove è stato in grado di trattenere il suo idrogeno che era certamente l'elemento di gran lunga più abbondante nella nebulosa solare. La Luna non ha potuto conservare nulla di questo gas.

Nell'involucro gassoso della Terra e al di sotto di esso nelle acque superficiali del mare e dei grandi laghi, la radiazione ultravioletta proveniente dal Sole era assai intensa. La superficie non era protetta dalla radiazione ultravioletta, come invece lo è ora, tramite uno schermo di ozono, perché l'ozono stesso è un derivato dell'ossigeno molecolare. L'elevata energia della radiazione ultravioletta ha innescato la sintesi di una grande varietà di composti organici, tra i quali gli amminoacidi. Forse la maggior parte di questi composti era già presente, dato che ora si sa che un certo numero di composti organici semplici sono presenti anche negli spazi interstellari.

La sintesi di composti organici transitori, tuttavia, non è la stessa necessaria a innescare la vita. La tappa successiva verso la vita deve essere stato lo sviluppo di grandi molecole e, prima ancora, lo sviluppo degli acidi nucleici che avrebbero alla fine fornito il meccanismo genetico di riproduzione in modo tale che le cellule potessero dividersi e dar luogo a cellule uguali a loro stesse.

Non è possibile essere certi del genere di ambiente chimico che sosterrà la vita: si tratta di un'incertezza che potrebbe diminuire sulla scorta dei risultati ottenuti dai Viking che atterreranno su Marte nell'estate di quest'anno. Tutto ciò che si sa ora è che la Terra è caratterizzata dalla presenza della vita e che questa dipende indiscutibilmente dalla presenza continua di acqua liquida. Attualmente la Terra è l'unico pianeta che soddisfi questa condizione. La traccia continua di vita presente sul nostro pianeta nel corso degli ultimi 3,5 miliardi di anni mostra con certezza che l'acqua liquida è stata disponibile per tutto questo tempo.

Una volta che la vita si è evoluta, ha cominciato a esercitare un importante effetto sulla superficie della Terra e sull'involucro gassoso che la circonda. Nella formazione di Bitter Springs dell'Australia centrale, che ha un'età di poco inferiore al miliardo di anni, i paleobotanici hanno trovato alghe cellulari che mostrano gran parte delle caratteristiche geometriche delle alghe azzurre attuali, le quali, oggi, come tutte le altre piante fotosintetiche, vivono rilasciando ossigeno come prodotto di scarto. Per la fine dell'era proterozoica, che è compresa tra l'Archeano e l'inizio del Paleozoico, deve esserci stato abbastanza ossigeno nell'atmosfera da sostenere l'evoluzione di organismi superiori. Questi sono i metazoi, organismi animali caratterizzati dall'avere molte cellule con funzioni differenziate. Tutti questi organismi hanno bisogno almeno di piccole quantità di ossigeno libero per svolgere le loro funzioni biochimiche.

L'ossigeno non è l'unico gas atmosferico che deriva da processi vitali: il metano, per esempio, può derivarne in piccole quantità. La sua sorgente principale sembra essere costituita da batteri che danno luogo, al di sopra delle paludi, ai caratteristici gas di palude. L'atmosfera contiene anche altri gas che sono prodotti caratteristici di processi vitali piuttosto che di reazioni chimiche non biologiche.

L'era proterozoica è stata un periodo di tempo in cui il mondo era popolato di batteri, alghe e altri organismi primitivi unicellulari probabilmente sia sulla terra sia nei mari. La loro influenza sui fenomeni superficiali è visibile nelle rocce proterozoiche. È particolarmente evidente nelle stromatoliti e cioè in formazioni

Questa è la spirale della storia della Terra; ogni giro dura un miliardo di anni. Muovendosi in senso orario verso lo zero (cioè oggi), si passa dapprima attraverso la tappa segnata a circa 4,5 miliardi di anni fa (*a*): questa è l'età della più antica roccia lunare conosciuta. Dopo il primo giro si arriva alla più antica roccia sedimentaria nota sulla Terra, ritrovata in Groenlandia (*b*). Circa 350 milioni di anni dopo (*c*) si giunge alla prima microstruttura simile a un fossile ritrovata nelle rocce dello Swaziland in Africa: queste possono rappresentare la prima flora del pianeta. Quasi un giro e mezzo dopo si arriva alle prime alghe vere e proprie, vecchie di circa 2 miliardi di anni (*d*), ritrovate nello scudo canadese. Restano soltanto due giri ancora: finisce l'Archeano e comincia il Proterozoico. Mezzo giro prima della fine della spirale cominciano le tradizionali suddivisioni geologiche: Paleozoico, Mesozoico, Cenozoico e Quaternario.

rocciose costituite da secrezioni calcaree rilasciate da tappeti di alghe filamentose nonché da particelle di sedimenti intrappolate in esse. Le stromatoliti sono presenti ancora in luoghi come le Bahamas e le Bermude in cui si stanno deponendo sedimenti calcarei su piani intertidali. Un'altra prova della vita proterozoica la si trova nell'esistenza di un certo numero di strati di carbone formatisi da masse di resti algali carbonizzati.

Se un osservatore qualunque avesse guardato verso la superficie della Terra da un satellite artificiale durante il Proterozoico, avrebbe descritto la superficie del pianeta più o meno nello stesso modo in cui un osservatore nelle stesse condizioni la descrive oggi. Soltanto uno strumento che potesse determinare la composizione chimica dell'atmosfera avrebbe potuto mettere in evidenza le diversità. La prova delle somiglianze si ritrova nelle rocce proterozoiche che sono dello stesso tipo e hanno un'abbondanza analoga a quelle di tutte le altre età.

Nel tardo Proterozoico il sistema Terra-Luna, dopo le instabilità iniziali, si è stabilizzato a formare il sistema che noi conosciamo oggi. Le maree dovrebbero essere state un po' più alte che non ora ma non sostanzialmente diverse. Circa nello stesso periodo in cui la Luna è diventata un pianeta freddo, il lungo periodo di riscaldamento e di differenziazione del mantello superiore e della crosta terrestri ha dato luogo a estese intrusioni di grandi ammassi di rocce granitiche e ad allineamenti di fasce montuose che suggeriscono un'origine attraverso i meccanismi legati alla tettonica a zolle.

Un altro tipo di prova, derivata da rocce proterozoiche e da rocce più recenti, indica l'inversione periodica dei poli magnetici nel corso della maggior parte della storia della Terra. A mano a mano che una roccia riscaldata si raffredda, essa registra una magnetizzazione orientata nella direzione del campo magnetico terrestre; questa struttura rimane «congelata» all'interno della roccia quando questa solidifica. Allo stesso modo, certi sedimenti che contengono particelle magnetiche registrano la direzione del campo attivo nel momento in cui essi si sono depositati. Le cause delle inversioni sono da ricercarsi nelle instabilità dei movimenti dei fluidi presenti nel nucleo, i quali sono la forza fondamentale che determina il campo magnetico della Terra.

Questo paleomagnetismo rivela quella che è stata chiamata migrazione dei poli anche se non è affatto vero che i poli nord e sud si siano mossi; piuttosto sono state le strutture superficiali della Terra a muoversi rispetto a essi. La conclusione è rafforzata da indizi paleoclimatici è cioè dalle indicazioni geologiche di antichi climi, come la presenza di strati di carbone nelle regioni polari e di depositi glaciali all'equatore. Da questo tipo di informazioni sembra che nel Proterozoico un continente principale si trovasse in corrispondenza del polo sud e che i meccanismi della deriva dei continenti si fossero già affermati come processo fondamentale dell'evoluzione della paleogeografia.

Le rocce, inoltre, registrano una grande glaciazione, la prima di cui si abbia una chiara dimostrazione. La prova è però insufficiente a rivelare i dettagli di questa glaciazione e cioè se essa aveva la stessa estensione di quelle poi verificatesi in tempi molto più recenti e se, come queste, essa è stata costituita da un certo numero di fasi di avanzata e di ritiro. Si può solo dedurre che i meccanismi postulati per le glaciazioni pleistoceniche hanno carattere generale: e cioè che una glaciazione viene innescata quando una massa continentale si trova presso uno dei poli e diminuisce le capacità degli oceani e dell'atmosfera di distribuire uniformemente il calore attorno al globo. Per un osservatore esterno, a quel tempo la Terra avrebbe dovuto somigliare un poco a Marte con la differenza che all'equatore c'erano già gli oceani. Una domanda interessante e che ci si può porre circa le epoche glaciali della Terra è perché il nostro pianeta è rimasto legato a una distribuzione di temperatura sufficientemente bassa per dar luogo a grandi calotte glaciali ma non abbastanza per congelarle totalmente.

La comparsa di ossigeno in quantità significative nell'atmosfera terrestre è un avvenimento ancora oggetto di controversia. Una ipotesi è mostrata in questo grafico semilogaritmico. Gli intervalli in ascisse sono dati in miliardi di anni prima di oggi; l'aumento nel contributo di ossigeno da tracce alle attuali quantità (circa il 20 per cento dell'atmosfera) è indicato sulle ordinate. Il processo di arricchimento deve essere stato graduale e collegato all'aumento di numero delle piante fotosintetiche. Il livello di ossigeno deve essere aumentato fino al 10 per cento del suo attuale valore circa 1 miliardo di anni fa; ma non vi sono indizi di vita animale fino a che, alla fine del Proterozoico, si ha un netto incremento nella curva dell'ossigeno atmosferico.

Come la storia dell'uomo occupa soltanto un brevissimo lasso di tempo rispetto alla preistoria, così gli ultimi 570 milioni di anni della storia della Terra (a partire dall'inizio del Paleozoico) sono soltanto un decimo dell'evoluzione precedente del nostro pianeta, la quale per lungo tempo è stata ritenuta un profondo mistero. Per più di un secolo gli ultimi 570 milioni di anni sono stati considerati come un periodo geologicamente noto: ecco perché spesso questo intervallo di tempo è chiamato, nell'insieme, Fanerozoico. Anche se i primi geologi avevano riconosciuto che alcuni terreni precambriani erano cartografabili con metodi geologici normali, è stata l'assenza di fossili dotati di affinità riconoscibili con forme attuali a rendere quel periodo impossibile da studiare. La scala stratigrafica, un orologio meravigliosamente dettagliato e preciso, dipende dai rapidi mutamenti evolutivi delle forme di vita più elevate: tali mutamenti sono registrati nei resti fossili di coralli, molluschi e di migliaia di altri tipi di metazoi.

Gli studiosi della storia della Terra non cessano di meravigliarsi della straordinaria velocità con cui sono comparsi i metazoi. Per circa 3 miliardi di anni, cioè quasi tutta la sua storia, la Terra è stata popolata da organismi unicellulari. Poi, in poche centinaia di milioni di anni, ecco apparire una quantità enorme di invertebrati differenziati in un modo fantastico. Rapidamente quasi tutti i tipi del regno animale si sono affermati e a essi sono presto seguiti i vertebrati e le piante vascolari.

Questo fenomeno è stato graduale, frutto di una congiunzione favorevole di continenti, mari e nicchie ecologiche? Oppure è stato la conseguenza inevitabile del progressivo arricchirsi in ossigeno dell'atmosfera terrestre per opera dell'attività delle alghe fotosintetiche? Ora la risposta ritenuta migliore è che sia stata proprio l'evoluzione dell'atmosfera a stimolare il ritmo evolutivo. Fra le invenzioni effettuate dagli organismi viventi c'è stata quella del guscio degli animali che è servita come un'armatura per proteggere gli esseri viventi a corpo molle dai predatori e per fornire a essi un punto d'attacco per la muscolatura. Le conchiglie forniscono la base per seguire e comprendere il corso successivo dell'evoluzione sia del pianeta sia dei suoi abitanti. Dati paleontologici basati esclusivamente sulla parte molle degli organismi avrebbero infatti fornito esclusivamente delle vaghe tracce del passato.

Le conchiglie sono assai più che punti fermi nella storia dell'evoluzione: esse hanno determinato importanti mutamenti nella dinamica della parte esterna della Terra. Gli oceani sono popolati di organismi capaci di fissare carbonato di calcio, fosfato di calcio e silice in enorme quantità. I loro resti si sono depositati sotto forma di sedimenti diventando, da ultimo, calcari, selci, rocce fosfatiche.

La conoscenza più precisa, ottenuta dai geologi sulle rocce paleozoiche, li ha messi in grado di seguire gli effetti della deriva dei continenti. In particolare è possibile cartografare con maggiore precisione la forma del primitivo oceano Atlantico che si estendeva tra le masse euroafricane e quelle americane prima ancora che il supercontinente di Pangea venisse a determinarsi alla fine del Paleozoico. La riunione della massa di Pangea è stato uno dei rari e speciali avvenimenti della parte finale della storia della Terra, una delle importanti perturbazioni dell'evoluzione del pianeta, per il resto più o meno ordinata.

Una delle conseguenze principali della formazione del Pangea è stata l'estinzione di centinaia di specie di invertebrati e l'inizio di un mutamento completo nei tipi di animali e piante presenti sul pianeta e nelle loro abbondanze relative. La maggior parte delle piattaforme continentali poco profonde che circondavano i continenti sono scomparse all'atto in cui i continenti stessi sono entrati in collisione lasciando soltanto uno stretto anello che circondava il supercontinente. Si tenga conto che le piattaforme continentali avevano ospitato le popolazioni biologiche più produttive del mondo paleozoico. La situazione geografica e gli estremi climatici che si verificavano nello stesso tempo, ivi compresa la glaciazione di parti delle attuali Africa, Australia e America meridionale, hanno determinato la scomparsa di una gran quantità di specie. Quelle che sono sopravvissute hanno generato la grande esplosione della vita postpaleozoica.

Il Pangea si è spezzato nel Triassico (la prima parte del Mesozoico): questo evento e la successiva apertura dell'oceano Atlantico oltre che la deriva dei continenti che li ha indotti ad assumere le loro posizioni attuali, sono gli elementi essenziali dell'evoluzione fisica della Terra verificatasi da allora. Le parti più antiche del fondo oceanico attualmente conservate sono nate allora e grazie a esse è diventata decifrabile la storia degli oceani del mondo. Essa si legge sulle anomalie magnetiche dei fondali e sulle zone di frattura formatesi in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche e delle zone tettonicamente attive.

Le nuove forme di vita evolutesi all'inizio del Mesozoico hanno plasmato il mondo moderno. Sono comparse le piante con fiore, le terre si sono coperte dei colori dei fiori e delle foglie delle piante decidue e delle erbe. Nel mare sono comparse nuove alghe fotosintetiche, le diatomee, che sono creature unicellulari capaci di fabbricarsi uno scheletro di silice. Le diatomee sono diventate le principali responsabili della produzione fotosintetica primaria di materia organica in mare.

All'incirca nello stesso periodo sono comparsi i foraminiferi calcarei. Essi sono esseri unicellulari che vivono galleggiando alla superficie del mare. I loro gusci costituiti di carbonato di calcio, piovendo lentamente sul fondo del mare, sono diventati la sorgente di un nuovo tipo di sedimenti di mare profondo, i fanghi a foraminiferi. I resti di questi foraminiferi sono importanti anche da un altro punto di vista: da essi si possono dedurre le temperature del mare di un tempo e da queste il tipo di climi vigenti allora, poiché entrambi influenzano la composizione isotopica e la forma esterna dei gusci. Sia la forma del guscio sia la proporzione relativa al suo interno di atomi di ossigeno normale (ossigeno 16) e del suo isotopo pesante raro (ossigeno 18), riflettono la temperatura dell'acqua nella quale l'animale è vissuto. Così si è misurata la temperatura degli oceani che ha rivelato importanti mutamenti climatici.

Per la maggior parte degli ultimi 50 milioni di anni, e cioè durante quasi tutto il Cenozoico, la Terra si è raffreddata. Questo fenomeno è culminato negli ultimi milioni di anni quando si sono innescate le glaciazioni. Le più recenti hanno influito anche sull'evoluzione di una specie particolare, l'uomo. L'uomo, dopo aver già compiuto buona parte del suo cammino evolutivo, è stato forzato a spostarsi con le sue culture primitive, mentre i ghiacciai coprivano la maggior parte dell'Europa settentrionale, dell'Asia e dell'America settentrionale. Negli ultimi 10 000 anni questi ghiacciai si sono ritirati fino alle posizioni che occupano oggi: in questo periodo l'uomo è diventato la specie che si è diffusa in quasi tutti gli ambienti della superficie terrestre. Nel momento in cui esso è riuscito in questa operazione, è divenuto l'ultima delle popolazioni biologiche a influire profondamente sullo sviluppo della storia della Terra. Soltanto ora egli incomincia a preoccuparsi del fatto che alcune delle sue attività possano alterare il sottile involucro dell'atmosfera, così come gli oceani e le acque dolci che rendono possibile la sua sopravvivenza.

La Luna

Mancando di atmosfera e di strati esterni geologicamente attivi, la Luna ha conservato tracce profonde di eventi molto antichi, anche se non dei primi, della storia del sistema solare

di John A. Wood

Per un geologo non esiste prospettiva più eccitante di quella di vedere un nuovo pianeta o corpo celeste interamente e improvvisamente disponibile per i suoi studi. Le missioni Apollo sulla superficie lunare hanno ottenuto proprio questo risultato, anche se ad avviarle sono state considerazioni di prestigio nazionale piuttosto che di progresso scientifico. Il lavoro scientifico vero e proprio ha pesato per non più del 5 per cento sul costo complessivo del progetto Apollo ed è riuscito a trasformare la Luna da freddo e distante cerchio di materiale biancheggiante in un vero e proprio pianeta – anche se piccolo – costituito da sostanze rocciose più o meno familiari nell'ambito delle quali ancora oggi è conservata traccia dell'attività geologica verificatasi nel più lontano passato.

Il programma scientifico ha coinvolto un gran numero di scienziati di diversi paesi e di approcci scientifici diversi. La molteplicità degli approcci è testimoniata dal numero e dalla diversità degli strumenti impiegati: microscopi, spettrometri di massa, reattori nucleari, magnetometri e sismometri; questi ultimi, in particolare, sono stati lasciati per sempre con le loro sensibili orecchie, calcate contro la superficie della Luna, a registrare la sua attività interna. I risultati di questi studi possono oggi essere accostati tra loro a dare un quadro coerente della composizione e dell'evoluzione della Luna. Una gran quantità di cose rimane da chiarire ma nelle sue linee più generali la storia della vita della Luna è ormai diventata comprensibile almeno tanto quanto lo è quella della Terra.

La concezione attuale della Luna può forse essere meglio sintetizzata seguendo un criterio cronologico e discutendo le epoche e gli stadi principali che il nostro satellite naturale sembra avere attraversato. Attualmente si possono riconoscere almeno sei stadi differenti: l'origine della Luna, la separazione di una crosta, una epoca iniziale di vulcanismo, un periodo di bombardamento da parte di planetesimali o protopianeti, una epoca successiva di vulcanismo e un declino finale dell'attività fino a raggiungere lo stadio attuale apparentemente quiescente.

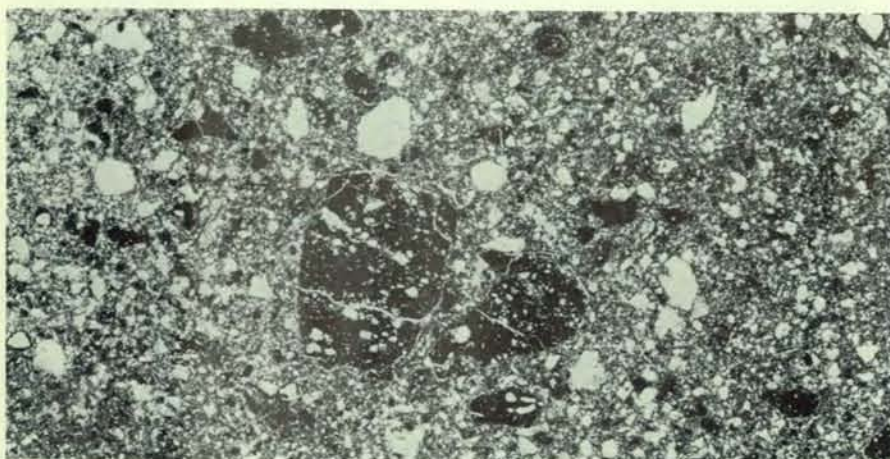
Quello dell'origine della Luna è lo stadio intorno al quale recentemente si è imparato di più. Ben pochi sono gli elementi offerti dai campioni lunari poiché essi hanno subito, dopo quella fase, una serie di processi geologici; i campioni lunari, infatti, sono costituiti da rocce la cui composizione è stata determinata da processi eruttivi avvenuti all'interno della Luna. Si può paragonare questo materiale alle rocce eruttive presenti sulla Terra: se gli astronauti fossero stati in grado di raccogliere campioni delle sostanze primordiali che hanno contribuito alla nascita della Luna, si sarebbe potuto apprendere una gran quantità di elementi circa le condizioni di formazione del nostro satellite. Purtroppo non è stato raccolto alcun campione di questo tipo probabilmente perché è assai improbabile che anche il più piccolo frammento di materiale primordiale abbia potuto sopravvivere agli eventi determinatisi durante la prima turbolenta parte della storia della Luna.

Comunque sono stati individuati alcuni dati certi a proposito delle condizioni nelle quali la Luna ha avuto origine. Primo, la Luna e la Terra si sono formate nella stessa regione del sistema solare; questa conclusione è basata sulla composizione isotopica dell'ossigeno dei campioni lunari che è identica a quella delle rocce terrestri. È questa un'osservazione importante perché lo studio delle meteoriti mostra invece che la proporzione tra l'isotopo leggero dell'ossigeno, l'ossigeno 16, e quelle degli isotopi più pesanti, l'ossigeno 17 e l'ossigeno 18, varia in modo misurabile a seconda del luogo di provenienza dei campioni rocciosi ottenuti in diverse parti del sistema solare.

Questa osservazione però non risolve in modo definitivo il problema dell'origine della Luna. Essa infatti potrebbe essersi ancora formata per distacco dalla Terra, per cattura da un'orbita pressocché indipendente oppure per accrezione di piccoli oggetti che un tempo si trovavano in orbita intorno al nostro pianeta. I dati sul rapporto isotopico dell'ossigeno, tuttavia, possono essere utilizzati per escludere la possibilità che la Luna sia stata catturata dalla Terra dopo essersi formata in un luogo molto lontano dal nostro pianeta, per esempio, presso Mercurio o tra i satelliti di Giove oppure ancor più lontano, addirittura al di fuori del sistema solare.

In secondo luogo, quando le rocce lunari vengono paragonate a quelle ter-

La superficie della Luna come è stata fotografata da un'altezza di 118 chilometri da Alfred M. Worden, pilota del modulo di comando e di servizio dell'*Apollo 15*. Come in tutte le missioni Apollo anche nel caso di *Apollo 15*, il pilota del modulo di comando è rimasto in orbita mentre gli altri due astronauti si avventuravano sulla superficie lunare. La distribuzione dei crateri in questa zona — che si trova sulla faccia nascosta della Luna a oriente del cratere Tsiolkovsky — è tipica e rappresentativa di tutta la superficie lunare ed è la conseguenza di un periodo di bombardamento da parte dei corpi meteoritici grandi e piccoli verificatosi all'inizio della storia evolutiva del sistema solare. Il cratere al centro della fotografia ha circa 19 chilometri di diametro: è più giovane dei terreni nelle sue vicinanze; ne sono una testimonianza i « raggi » chiari di materiale espulso dal cratere sovrapposto alle strutture adiacenti.

Su questa pagina sono riportate le microfotografie di tre tipi di rocce lunari viste in luce trasmessa a un ingrandimento di 15 volte. La foto qui sopra mostra la sezione sottile di un basalto che è il tipo di roccia caratteristica dei mari lunari. Il basalto mostra una struttura in cui silicati e ossidi, cristallizzatisi quando una colata di basalto si raffreddò nel mare Imbrium, si intersecano tra loro. Il campione roccioso da cui è stata ricavata questa sezione sottile è stato portato da *Apollo 15* nel 1971.

La norite KREEP è un secondo tipo di roccia lunare e uno dei due più diffusi sugli altopiani lunari. La sigla KREEP si riferisce al contenuto relativamente elevato di potassio (K), elementi delle terre rare (*rare-earth elements*, REE) e fosforo (P). Questo campione è una breccia, cioè l'insieme di frammenti di minerali e rocce fra loro cementati e derivati dal bombardamento della superficie lunare agli inizi della sua storia da parte di grandi corpi meteoritici. La roccia da cui è stata ricavata questa sezione è stata raccolta dagli astronauti che hanno raggiunto la Luna con *Apollo 14*.

Le rocce di tipo anortositico sono di gran lunga le più abbondanti sulla superficie della Luna. Questo campione, ripreso in luce polarizzata, è una breccia costituita in larga parte da frammenti di plagioclasio, che è stata riportata a Terra da *Apollo 16*.

restri e alle meteoriti, esse vengono sistematicamente trovate più povere per quanto riguarda gli elementi chimici più volatili. Questo impoverimento appare in tutta la sua entità se si paragona l'abbondanza dei singoli elementi in un basalto lunare e in uno terrestre (*si veda la figura nella pagina a fronte*). I basalti sono rocce eruttive secondarie e non materiali primari che hanno contribuito alla formazione primordiale del corpo celeste: le differenze di composizione tra i basalti e i due corpi celesti, tuttavia, riflettono le differenze nella composizione dei più primitivi materiali planetari dai quali i basalti stessi sono derivati.

I pianeti di tipo terrestre, e cioè Mercurio, Venere, la Terra e Marte, secondo l'opinione corrente, si sono formati attraverso due fasi fondamentali: la prima, che consiste nella condensazione di piccoli granuli minerali nell'ambito della nebulosa gassosa originaria che si pensa dovesse originariamente circondare il Sole; e la seconda, costituita dall'aggregazione meccanica dei granuli minerali a formare corpi celesti indipendenti. Come la nebulosa calda ha cominciato, all'inizio, a raffreddarsi? I minerali a più alto punto di fusione hanno cominciato a condensare; in seguito hanno seguito la stessa sorte i composti via via più volatili.

Se in tutto il sistema solare i fenomeni di condensazione e di aggregazione si sono verificati più o meno nello stesso periodo, una serie di circostanze diverse può avere contribuito a liberare nei diversi pianeti proporzioni variabili di sostanze d'alta e bassa temperatura. Per esempio, gli oggetti celesti che hanno cominciato ad aggregarsi per primi, potrebbero, secondo logica, essere stati quelli che hanno catturato la maggior parte delle sostanze condensatesi per prime e cioè quelle a più alto punto di fusione. La scoperta che la Luna e la Terra contengono proporzioni abbastanza diverse di sostanze ad alto e basso punto di fusione, può far sembrare che il frazionamento sia frutto di fenomeni verificatisi nel corso della formazione stessa dei due corpi celesti.

In realtà, per ciò che concerne il meccanismo di formazione della Luna come satellite della Terra, le tre possibilità menzionate sopra e che erano state individuate molto tempo prima che si pensasse al progetto Apollo, devono ancora essere prese in considerazione. Tuttavia, secondo l'opinione di un certo numero di selenologi, il modello più probabile è quello che prevede l'aggregazione di materiale in orbita attorno alla Terra, seppure con qualche variante.

Il modello invece che prevede la cattura di un corpo celeste pressoché intatto, mostra serie difficoltà di tipo dinamico. Esse possono essere riassunte nel modo più semplice, notando che l'orbita di un oggetto attorno a un altro è simmetrica rispetto alla linea che li separa nel momento del loro maggiore avvicinamento. Se la Luna si è avvicinata alla Terra da un qualche luogo distante nell'ambito del sistema solare, essa avrebbe dovuto, dopo essersi avvicinata al massimo, tornare a raggiungere una distanza non molto diversa lungo un'orbita pressocché simmetrica con la sua traiettoria di avvicinamento. A meno di non introdurre nel modello speciali condizioni che abbiano determinato il rallentamento della Luna mentre era più prossima alla Terra, essa non sarebbe stata catturata.

Anche l'idea che la Luna sia un pezzo distaccatosi dalla Terra presenta alcune difficoltà. Prima di tutto occorre presupporre una velocità di rotazione estremamente elevata all'inizio. Dopo la rottura il sistema Terra-Luna avrebbe conservato un momento angolare doppio di quello di cui il sistema è dotato oggi. Dato che normalmente nei sistemi dinamici il momento angolare viene conservato, occorrerebbe introdurre condizioni particolari che abbiano determinato l'abbassamento del momento angolare del sistema Terra-Luna dopo la sua bipartizione.

Se, a questo punto, il modello preferibile sembra essere quello dell'aggregazione della Luna in orbita attorno alla Terra, da dove sono venute le particelle che hanno contribuito alla costruzione del nostro satellite? Esse si sono probabilmente condensate nell'ambito del sistema solare e solo in seguito sono state catturate dalla Terra e avviate in orbita attorno ad essa. È più facile catturare un gran numero di piccoli oggetti che non pensare alla cattura di uno grande come una Luna precostituitasi.

Confronto tra i basalti della Luna e quelli della Terra: i primi risultano sistematicamente impoveriti in elementi volatili che dovrebbero essersi condensati a temperature piuttosto basse quando il sistema solare si formò dalla nebulosa gassosa. Il diagramma mostra per ciascun elemento il rapporto tra la sua abbondanza nei basalti lunari con quella nei basalti terrestri. La differenza esistente indica un processo di frazionamento che avrebbe messo a disposizione una maggior quantità dei condensati di alta temperatura agli oggetti del sistema solare che si sono formati per primi.

Diversi meccanismi naturali avrebbero contribuito a rallentare le particelle più piccole in modo che queste potessero essere catturate dalla Terra. Uno di questi meccanismi è l'attrito provocato dai gas. I gas della nebulosa avrebbero opposto una certa resistenza e avrebbero rallentato il movimento delle piccole particelle ma non quello di un oggetto massiccio quanto la Luna. Un altro meccanismo è quello della collisione tra particelle. Avvicinandosi alla Terra da tutte le direzioni, alcune particelle sarebbero entrate in orbita in senso orario e altre in senso antiorario. Le collisioni che devono essersi verificate tra i membri di queste due famiglie di particelle possono avere rallentato la loro velocità iniziale facendo sì che esse non lasciassero l'orbita terrestre. Le collisioni sarebbero continuate fino a che tutte le particelle o avessero raggiunto velocità tali da dover cadere sulla superficie terrestre oppure fossero state proiettate su un'orbita circolare comune nella quale tutti i frammenti avessero un senso di rotazione identico.

Si è valutato che la Luna potrebbe essersi formata da un disco di particelle di questo tipo in meno di mille anni. Non è chiaro se si sia formata così velocemente oppure no. Se piccole particelle hanno continuato a essere catturate in orbita attorno alla Terra per un periodo di tempo più lungo, è chiaro che l'aggiunta di particelle alla Luna deve essersi corrispondentemente protratta. Non è, inoltre, ancora chiaro perché la Luna in via di aggregazione dovrebbe aver catturato più particelle ad alto punto di fusione – cioè un numero maggiore delle prime particelle condensatesi – che non la adiacente e più voluminosa Terra.

Per discutere l'evoluzione interna della Luna una volta che questa si è formata, è necessario basarsi sui tipi di rocce trovate sulla superficie del nostro satellite. Anche se gli astronauti delle missioni Apollo hanno raccolto una gran varietà di tipi di rocce diverse, quasi tutti i campioni possono essere classificati in una o nell'altra di tre categorie fondamentali: basalti dei mari; noriti di tipo KREEP, il cui nome deriva dal contenuto eccezionalmen-

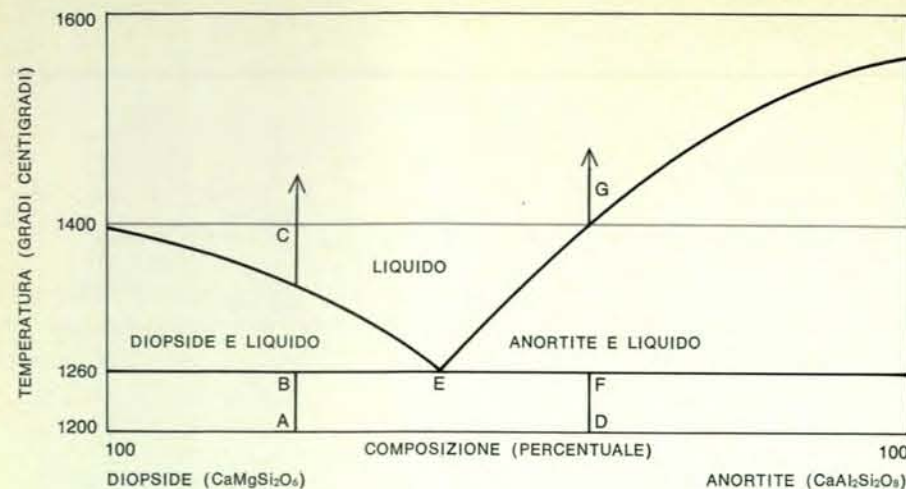
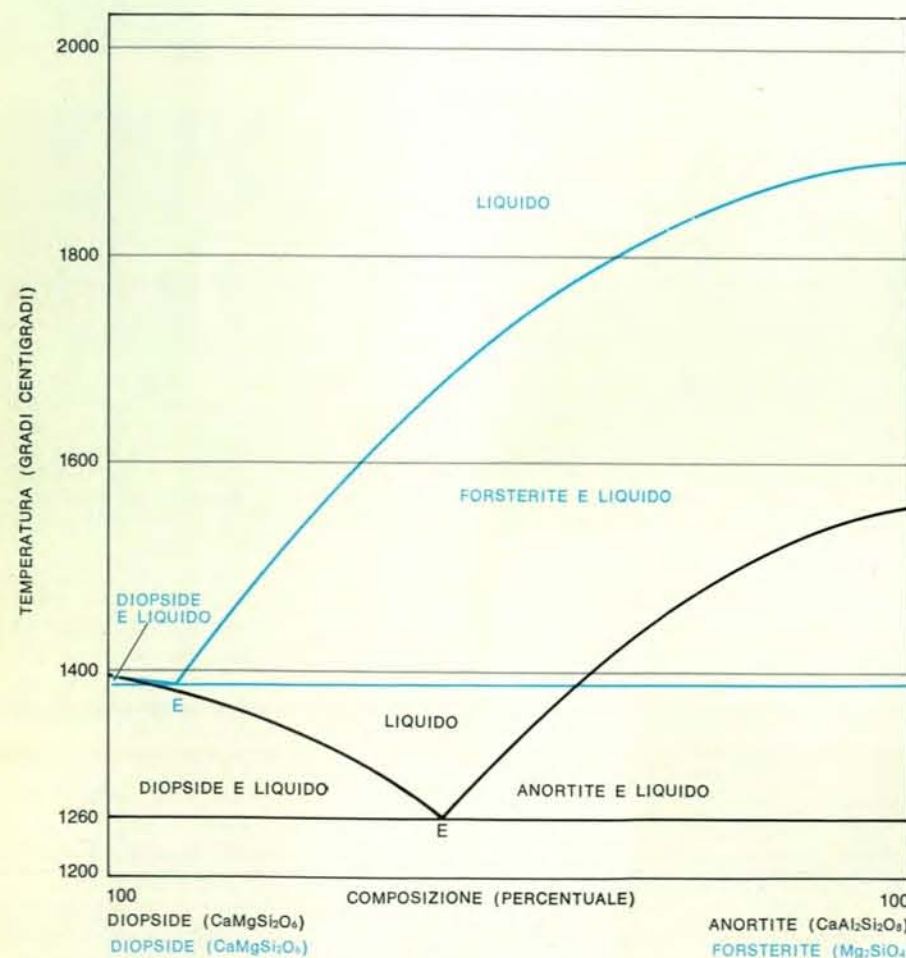



Diagramma di fase che descrive il fenomeno della fusione parziale che produce materiali a composizione diversa. Un materiale costituito da diopside e anortite nelle proporzioni di 76 e 24% rispettivamente rimane solido se la temperatura rimane nell'intervallo *AB* fino a che, a una temperatura attorno ai 1260 °C, non compare un liquido di composizione *E*. La fusione è sufficiente a eliminare l'anortite solida. Quando la temperatura sale ulteriormente, la composizione del fuso si sposta da *E* verso *C*, mentre una quantità sempre maggiore di diopside residuale finisce con il fondere. In corrispondenza del punto *C* l'ultimo residuo solido scompare. Qualcosa di simile avviene se un solido contenente diverse proporzioni di questi minerali — per esempio 40% di diopside e 60% di anortite — viene riscaldato. Il punto chiave è che quali che siano le composizioni di partenza, il primo liquido ad apparire ha la stessa composizione (*E*).

Confronto fra i diagrammi di fase di due minerali. Un sistema si può definire in base ai suoi componenti estremi; così, nel diagramma qui sopra abbiamo un sistema diopside-forsterite (*colore*) e un sistema diopside-anortite (*nero*). Da due sistemi diversi nasce un diverso liquido di fusione quando la temperatura viene innalzata. Ancora, tuttavia, la composizione di questo liquido resta la stessa indipendentemente dalle proporzioni con cui sono presenti i termini estremi del sistema nel materiale di partenza.

te alto di potassio (K), elementi delle terre rare (*rare-earth elements*, REE) e fosforo (P); rocce di tipo anortositico. I basalti dei mari costituiscono la sostanza fondamentale dei mari lunari scuri e relativamente uniformi; gli altri due tipi di rocce, invece, costituiscono gli assai più irregolari altopiani caratterizzati da colore più chiaro.

Nessuno di questi tre tipi di rocce può essere immaginato come rappresentativo del materiale primordiale della Luna. La loro abbondanza per quanto riguarda i singoli elementi ha qualche somiglianza con l'andamento del contenuto di elementi metallici dell'atmosfera del Sole oppure nelle meteoriti condritiche che si pensa siano certamente rappresentative del materiale primario con cui si è formato il sistema solare. D'altro canto tutte e tre le classi hanno una stretta somiglianza con le rocce eruttive che si trovano sulla Terra. È chiaro che i processi eruttivi hanno stabilito la composizione di tutte e tre le categorie di rocce lunari che noi conosciamo.

L'esperienza sulle classi di rocce eruttive presenti sulla Terra permette di riconoscere due tipi di processi eruttivi fondamentalmente diversi che hanno frazionato dal punto di vista chimico le rocce lunari per produrne di nuove e diverse. Uno è la fusione parziale. Per valutare a fondo il significato di questo concetto, il lettore dovrebbe riferirsi al diagramma di fase che illustra il comportamento di questi materiali al mutare della temperatura. Diagrammi di fase di questo tipo sono stati messi a punto in relazione ad accuratissime sperimentazioni nell'ambito delle quali materiali rappresentativi di rocce di composizione varia venivano posti in contenitori opportuni e sottoposti alle temperature e pressioni caratteristiche dell'interno del pianeta. Osservando il diagramma di fase, ci si rende conto che al crescere della temperatura in un materiale la cui composizione può essere rappresentata nei termini di una miscela di diopside e anortite, la composizione del primo liquido che compare è la stessa quali che siano le proporzioni di diopside e anortite nel materiale di partenza.

I materiali rocciosi che si presentano realmente sulla Terra e sulla Luna sono troppo complessi per poter essere rappresentati da un diagramma binario; spesso i loro diagrammi di fase comportano tre o più composti finali e talvolta non possono essere adeguatamente rappresentati sui diagrammi bidimensionali. Ciononostante, il punto indicato sopra rimane valido: il primo fuso che appare quando una massa rocciosa viene riscaldata, ha una composizione tipica.

Quando la fusione incomincia all'interno della Terra, sembra che di norma il primo liquido a formarsi non resista a lungo in compagnia del materiale solido residuale. Invece questo tende a risalire verso la crosta e a fuoruscire attraverso la superficie sotto forma di lava. La composizione di una lava terrestre corrisponde spesso alla composizione di sostanze a basso punto di fusione che compaiono in certi particolari diagrammi di fase. I composti finali che definiscono il diagramma e il regime di pressione per il quale esso è valido possono essere una testimonianza della profondità dalla quale la lava è derivata e dei materiali che erano presenti nella roccia originaria che ha dato luogo ad essi. Cosicché la natura della parte più interna dei pianeti può essere intuita determinando la composizione della lava e collegando a essa i diagrammi di fase.

Tornando alla tripartizione dei tipi di rocce lunari, ne risulta che i basalti dei mari e la norite KREEP hanno composizioni a basso punto di fusione caratteristiche e dunque devono essere state prodotte dalla fusione parziale di materiali all'interno della Luna. Essi rappresentano le ultime fasi dell'evoluzione della Luna che verranno discusse più avanti. Le rocce anortositiche, tuttavia, hanno composizioni assai diverse dai liquidi a basso punto di fusione. Queste rocce possono essere state prodotte da un diverso tipo di processo eruttivo e cioè dalla cristallizzazione frazionata.

Quando un fuso eruttivo comincia a cristallizzare, i cristalli che si formano generalmente non hanno la stessa densità del liquido. Se la cristallizzazione non è troppo rapida, i cristalli densi tendono a sprofondare verso il fondo della soluzione mentre quelli leggeri (se ce n'è qualcuno) tendono a galleggiare in superficie. In questo modo possono formarsi strati nei quali un certo minerale è particolarmente concentrato. La crosta della Terra infatti contiene rocce eruttive che sono ovviamente frutto di un processo di frazionamento.

Le rocce anortositiche sono caratterizzate dalla sovrabbondanza di un certo minerale, che è il feldspato plagioclasico $CaAl_2Si_2O_8$. È facile delineare la formazione di questo tipo di roccia per cristallizzazione frazionata in laghi di lava sulla Luna. La difficoltà è che la Luna possiede enormi estensioni di rocce anortositiche che sono di gran lunga le più abbondanti tra le tre classi di rocce lunari. Apparentemente l'intera crosta della Luna, fino a una profondità compresa tra 50 e 100 chilometri e oltre, è di tipo anortositico. Il frazionamento locale in laghi di lava dovreb-

be essere del tutto inadeguato a formare una tale quantità di rocce anortositiche.

Come è possibile che la Luna abbia una tal quantità di questo materiale? Dopo tutto gli astronauti del programma Apollo hanno appena grattato la superficie del nostro satellite in sei punti dell'emisfero della Luna rivolto verso la Terra. Oltre al lavoro compiuto dagli astronauti si può aggiungere quello eseguito dalle sonde russe *Luna 16* e *Luna 20* che hanno campionato due punti e *Surveyor 7* che ha, nel 1968, analizzato la composizione delle rocce negli altopiani meridionali del nostro satellite.

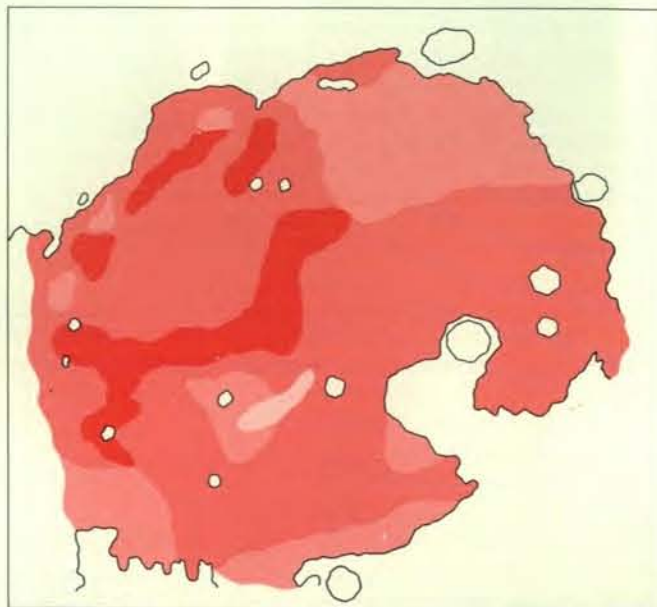
Relativamente alla Luna, si possono trarre conclusioni a proposito della composizione della crosta fino a notevole profondità poiché, anche se gli astronauti non hanno avuto a disposizione i mezzi per scavare a fondo, si sono trovati a disposizione profondi crateri che avevano fatto questo lavoro per loro. Gli urti violentissimi che si possono considerare responsabili della formazione dei bacini lunari hanno perforato la crosta per profondità di molte centinaia di metri e hanno lanciato i detriti qua e là per tutta la sua superficie. La maggior parte del materiale raccolto dagli astronauti deve aver avuto questa origine, cosicché la crosta lunare è soprattutto di tipo anortositico: la Luna di certo non nasconde nelle sue viscere un altro tipo di roccia al di sotto di un velo sottile di materiale anortositico poiché se così fosse l'impatto delle meteoriti l'avrebbe svelato ormai da molto tempo.

Gli studi sismici hanno fornito una misura reale dello spessore della crosta lunare sul lato rivolto verso Terra. Tutte le missioni Apollo hanno lasciato sulla Luna stazioni geofisiche perfettamente funzionanti. La maggior parte di esse comprendeva sismometri passivi che hanno continuato a trasmettere sempre una registrazione completa dei disturbi sismici lunari. I primi segnali di questo tipo sono stati generati deliberatamente dall'uomo durante le missioni Apollo provocando l'impatto sulla Luna in un punto ben determinato di parti delle navicelle spaziali. Propagandosi verso le diverse stazioni di osservazione geofisica, le onde generate da questi impatti, hanno attraversato un certo numero di materiali caratterizzati da differenti velocità sismiche.

Quando si considera un modello della struttura della crosta che si accordi con le velocità sismiche ricavate dai diversi sismometri sparsi sulla superficie lunare, ci si accorge che è necessario introdurre una discontinuità nelle proprietà fisiche delle rocce a una profondità di circa 60 chilometri. Al di sopra di questa profondità le velocità sismiche si accordano con quelle caratteristiche di rocce di tipo anortositico. Al di sotto dei 60 chilometri di profondità invece, le velocità sismiche sono più elevate e cioè si aggirano intorno agli 8 chilometri al secondo, mentre negli strati superiori non superavano i 6,5 chilometri al secondo. La velocità riscontrata al di sotto dei 60 chilometri di profondità è adeguata a un tipo di roccia di alta densità, e cioè presumibilmente al materiale che costituisce il mantello lunare.

L'estensione a livello di tutta la Luna delle rocce anortositiche è stata confermata da analisi geochimiche ottenute tramite gli strumenti portati sulla Luna dai moduli di comando e di servizio di *Apollo 15* e *Apollo 16*: il modulo di comando e di servizio è il veicolo nel quale il terzo astronauta rimane a viaggiare in orbita attorno alla Luna mentre gli altri due astronauti ne esplorano la superficie. Il veicolo era dotato di una serie di strumenti adatti a misurare le caratteristiche del suolo lunare. Tra questi vi era uno strumento sensibile ai raggi X che venivano emessi da elementi compresi nel suolo lunare come frutto dello stimolo operato dalla radiazione primaria proveniente dal Sole. Lo strumento riusciva a distinguere tra i raggi X emessi dal magnesio, dall'alluminio e dal silicio.

Le rocce anortositiche sono caratterizzate da un rapporto eccezionalmente elevato tra alluminio e silicio. L'esperimento a raggi X ha dimostrato che il materiale di questo tipo costituisce l'ossatura della maggior parte degli altopiani lunari sui quali sono state raccolte informazioni composizionali. La scoperta costituisce la base per trarre la conclusione più generale che gli altopiani hanno un carattere anortositico. Naturalmente sarebbe opportuno confermare questa conclusione studiando campioni raccolti sul lato nascosto della superficie lunare e nelle regioni polari.

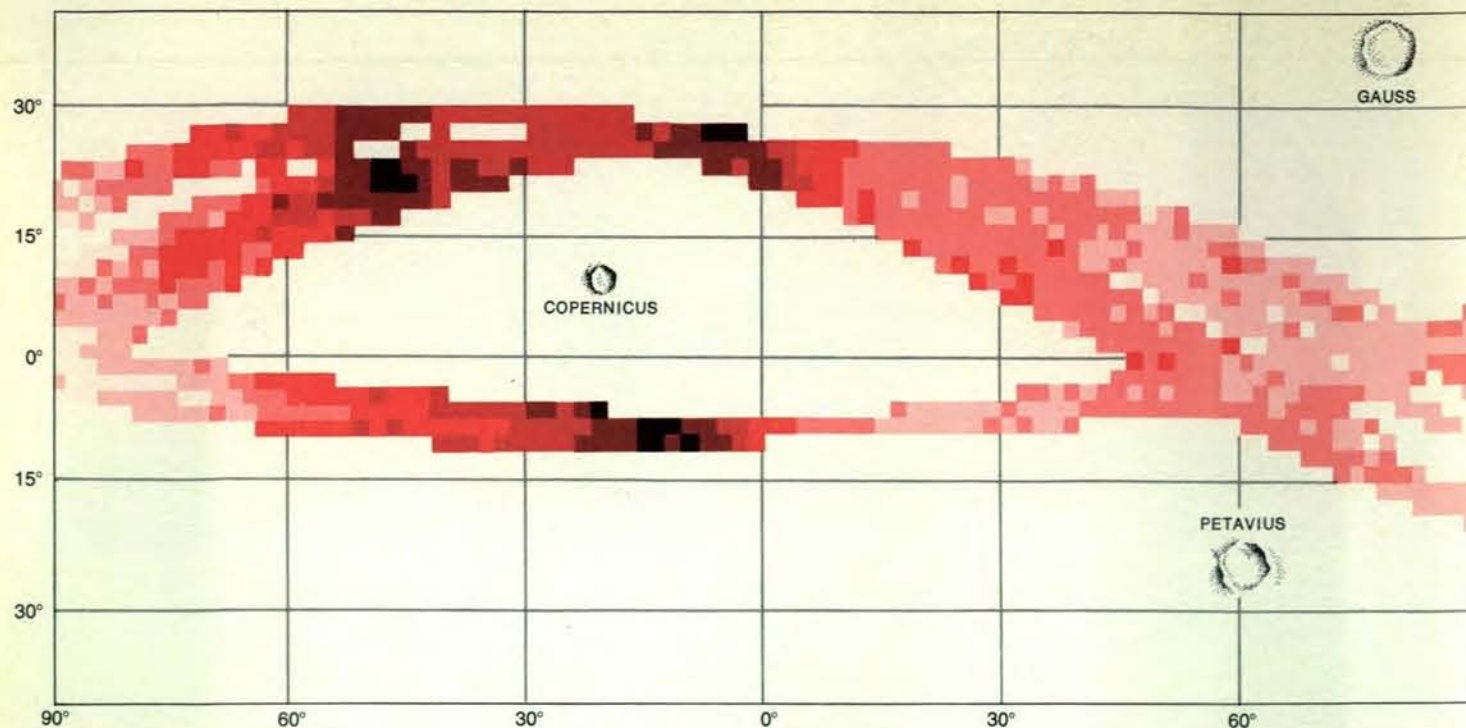
Nel mare Imbrium è evidente il sovrapporsi di diverse colate laviche. Esse si possono riconoscere anche sulla base del numero diverso di crateri dai quali sono interessate. A sinistra il mare Imbrium così come appare in una fotografia ripresa dal Lick Observatory. A destra una mappa nella quale il colore più intenso rappresenta le colate di lava più recenti che sono quelle che sono state meno interessate dalla craterizzazione; i colori più tenui quelle più antiche. Le più estese hanno 3,3 miliardi di anni.

Proprietà dell'interno della Luna. La distinzione tra crosta, mantello e nucleo (*a sinistra*) è basata su differenze composizionali e sulla diversa densità delle rocce. La distinzione tra litosfera e astenosfera (*a destra*) è basata sulla rigidità (e dunque sulla temperatura) indicata dalle onde sismiche. Le onde di compressione (*linee continue*) da terremoti lunari profondi (*punti neri*) attraversano qualunque materiale. Le onde trasversali (*linee tratteggiate*) sono invece attenuate da un mezzo che non sia rigido. Questo fenomeno indica la presenza a una certa profondità nel nostro satellite di una zona semifluida e calda.

Se la roccia anortositica può formarsi soltanto per cristallizzazione frazionata da una soluzione ad alta temperatura e se lo strato di roccia anortositica prodotta attraverso questo meccanismo ha sulla Luna uno spessore di circa 50 chilometri, si è costretti a ammettere l'esistenza nella storia primitiva della Luna di uno strato di magma che doveva avere dimensioni ciclopiche, un vero e proprio oceano di rocce incandescenti che dovevano ricoprire di una bianca schiuma tutta la superficie del nostro satellite naturale. L'attuale crosta lunare deve essersi separata da questa miscela infernale nel momento stesso in cui questa ha cominciato a raffreddarsi. Si può discutere se il plagioclasio in via di cristallizzazione possa avere galleggiato a lungo sulla superficie di questo oceano roccioso, poiché la densità del plagioclasio e del magma residuo deve essere stata più o meno la stessa. Se tuttavia gli altri minerali in via di cristallizzazione – minerali ricchi di ferro, magnesio e certamente più densi del liquido – sono sprofondati, l'effetto finale deve essere stato di concentrare il plagioclasio in prossimità della superficie superiore del sistema. Questo giustifica il carattere anortositico, cioè ricco di plagioclasio di questo tipo, dell'attuale crosta solida e fredda della Luna.

Il secondo stadio della storia della Luna è stato quello della separazione della crosta. Tutti i pianeti di tipo terrestre, ivi compresa la Terra, debbono avere attraversato uno stadio di questo tipo, anche se tutte le tracce di una fase di questo genere sono state da lungo tempo cancellate dal nostro pianeta. La separazione della crosta lunare si è verificata probabilmente poco dopo la formazione stessa della Luna.

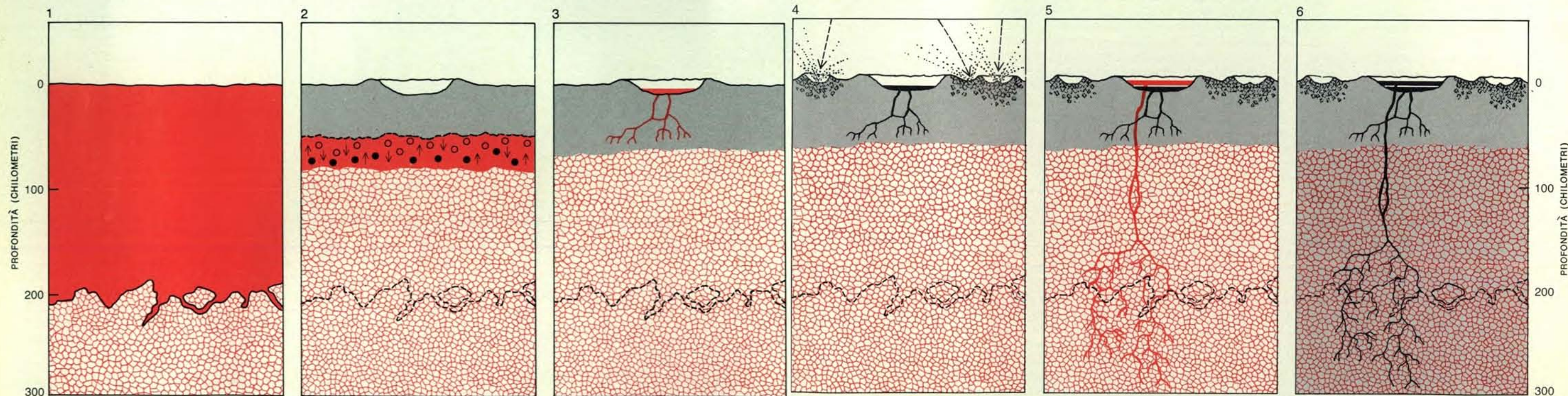
Questo concetto non ha un avallo chiaro da parte delle età dei campioni anortositici della superficie lunare, età basate sul decadimento degli elementi radioattivi. Queste età si aggirano intorno ai 4 miliardi di anni, un'età non eccessiva se paragonata ai 4,6 miliardi di anni attribuiti all'origine del sistema solare e ai pianeti stessi. Le età radiometriche probabilmente non riflettono il momento in cui si sono formate le rocce degli altopiani: eventi energetici successivi devono aver azzerato nuovamente gli orologi radioattivi delle rocce.

La ragione più valida a favore della separazione della crosta lunare all'inizio della storia del satellite è che questo evento è più probabile, poiché gli strati superficiali della Luna devono allora essere stati fusi. È probabile dunque che l'origine planetaria sia stata un processo violento. Minipianeti e particelle devono essersi precipitati con velocità considerevole ed energia cinetica elevata su un oggetto che doveva avere un campo gravitazionale sensibile. L'energia cinetica, all'atto dell'impatto, deve essersi tramutata in calore se l'aggregazione del corpo celeste si è verificata più rapidamente di quanto il calore stesso non potesse essere disperso, il calore risultante dagli impatti dovrebbe essere stato conservato e aver contribuito a fondere lo strato più esterno della Luna dello spessore di diverse centinaia di chilometri. È difficile spiegare, per tempi successivi, la presenza di fenomeni di fusione estesa sulla superficie lunare; lo stato normale del corpo celeste è quello di una superficie esposta direttamente allo spazio cosmico e che quindi tende a raffreddarsi inesorabilmente.

La terza fase nella storia della Luna è quella che ha visto la comparsa improvvisa della norite a base KREEP. Quello che stupisce in questo materiale non è la composizione di base, bensì il contenuto in certi elementi minori ed elementi in traccia, quali ad esempio il potassio, il fosforo, il bario, le terre rare, l'uranio e il torio, che compaiono in proporzioni da 50 a 100 volte superiori a quelle delle rocce anortositiche normali. Come abbiamo avuto occasione di dire, la norite KREEP ha una composizione tale da rendere l'insieme una miscela a basso punto di fusione prodotta probabilmente da fusione parziale nell'interno stesso della Luna. Il diagramma di fase adatto presenta come componenti estremi gli stessi minerali che si trovano di fatto nelle rocce lunari anortositiche. Il diagramma è valido anche a pressioni relativamente basse. Apparentemente il luogo più adatto per la produzione della norite KREEP è stata la crosta anortositica, in un momento successivo

Lo spettrometro a raggi gamma, presente sui moduli di comando e di servizio di *Apollo 15* e *16*, ha individuato la radioattività naturale del suolo lunare. Tale radioattività è dovuta al decadimento di uranio, potassio 40 e torio. La radioattività, tanto più intensa quanto più intenso è il colore nella mappa qui sopra, laddove è massima corrisponde alla presenza di circa lo 0,3% di potassio e di sette parti per milione di torio. Le regioni indicate con i colori più tenui sono caratterizzate da concentrazioni di circa lo 0,1% di potassio e di circa 0,3 parti per milione di torio. Il veicolo di *Apollo 15*, posto su un'orbita inclinata, ha seguito un percorso all'incirca sinusoidale. Il veicolo di *Apollo 16* ha seguito percorsi all'incirca rettilinei.

a quello della sua separazione stessa.

Gli elementi minori e in traccia che hanno arricchito la norite KREEP sono tutti caratterizzati dalla presenza nella loro struttura di ioni abbastanza larghi, cioè di atomi abbastanza grossi che hanno guadagnato o perso nel reticolo atomico degli elettroni. Tali ioni non si sistemano tanto facilmente nella struttura cristallina dei minerali più importanti delle rocce anortositiche. Come risultato, questi elementi dovrebbero essere stati tra gli ultimi a solidificare quando il sistema anortositico si è raffreddato ed essi sono stati tra i primi a essere rimobilizzati se sono stati nuovamente riscaldati. La concentrazione elevata di ioni nella norite KREEP si accorda tuttavia con l'ipotesi che la norite sia stata prodotta da fusione parziale delle rocce anortositiche. La concentrazione di elementi caratterizzati da ioni a raggio elevato implica anche che solo la prima piccola percentuale di liquido sia stata liberata dalla roccia madre prima che il corpo sostanziale del liquido fosse separato per essere concentrato poi nel magma e nella lava del tipo norite KREEP.

Forse l'aspetto più problematico della norite KREEP è la sua comparsa sulla superficie lunare. I sensori a raggi gamma, posti sul modulo di comando e di servizio lasciato in orbita lunare, hanno percepito concentrazioni elevate di elementi radioattivi in tutta l'area del mare Imbrium e dell'oceano Procellarum, soprattutto nei punti in cui terreni degli altipiani, di colore chiaro, si introducono e attraversano i basalti che in genere ricorrono in queste zone. Evidentemente queste regioni di altopia-

Evoluzione della Luna: il processo comprende roccia fusa (*colore intenso*), il mantello lunare (*colore tenue*) e la crosta (*grigio*). Questi stadi sono la fusione superficiale all'atto in cui si è formata la Luna (*1*), la separazione di una crosta a bassa densità per cristallizzazione frazionata (*2*), l'origine della norite KREEP per fusione parziale nella crosta profonda (*3*), la craterizzazione intensiva (*4*), l'origine dei basalti dei mari per fusione parziale del mantello superiore (*5*), e la quiescenza (*6*).

ni sono costituite da norite KREEP in quantità maggiore che non di rocce anortositiche. Sembra che in qualche momento dopo la formazione della crosta anortositica della Luna, ma prima della eruzione dei basalti lunari che ora ricoprono tutto il paesaggio, lave di tipo norite KREEP abbiano ricoperto una parte di questa regione della Luna.

La sorgente del calore necessario a rifondere parzialmente il materiale crostale anortositico non è nota; non lo è nemmeno la ragione per cui l'eruzione si è concentrata in una sola zona limitata. Tentativamente si può postulare che l'impatto di un grande corpo planetesimale abbia fornito l'energia necessaria a scavare il bacino e un cratere largo quanto l'oceano Procellarum che qua e là si sarebbe fuso completamente. Non avrebbe invece dato inizio alla modesta fusione parziale necessaria per generare la norite KREEP. L'origine di questo tipo di roccia rimane uno dei più importanti e misteriosi problemi della scienza lunare.

Il quarto atto della storia della Luna è costituito da una serie di impatti di corpi di grandi dimensioni sulla superficie della Luna. La nostra rappresentazione dell'origine del sistema solare, infatti, comporta l'aggregazione graduale di particelle grandi e piccole fino a costituire l'attuale varietà di pianeti e satelliti. Il sistema solare primordiale deve essere stato un luogo estremamente disordinato fino a che tutti i detriti sparsi non sono stati spazzati via. Nello stesso tempo questi detriti bombardavano incessantemente i giovani pianeti. La superficie craterica degli altopiani lunari costituisce la prima testimonianza di questo antico bombardamento interplanetario. Altrettanto dicasi per la natura delle rocce stesse che costituiscono questi altopiani: esse sono quasi tutte brecce, cioè frammenti cementati di rocce e minerali preesistenti. Gli impatti hanno polverizzato e quindi cancellato qualunque struttura delle antiche rocce degli altopiani che dovevano essere collegate con una cristallizzazione frazionata a scala planetaria o con gigantesche eruzioni superficiali.

Gli impatti più importanti non hanno soltanto spezzato le rocce superficiali ma le hanno anche riscaldate. Il riscaldamento di una roccia ha anche l'effetto di risistemare la registrazione isotopica cancellando ogni effetto precedente e riportandone invece l'inizio al momento stesso della genesi dell'attuale composizione chimica. In una parola, l'orologio isotopico è rimesso a zero. Ciò significa che l'interpretazione delle età delle rocce degli altopiani lunari è da vedere con particolare attenzione. L'età di quattro miliardi di anni alla quale esse tendono, non è, chiaramente, il momento nel quale si sono formate. Al contrario, vi sono prove isotopiche che tanto i materiali anortositici quanto quelli noritici hanno un'età superiore a quella dei 4 miliardi di anni. Solo più tardi alcuni processi violenti che hanno comportato eventi di alta temperatura hanno spostato l'orologio isotopico a 4 miliardi di anni fa.

Gli eventi violenti in questione sono quasi certamente gli impatti colossali che hanno scavato gli enormi bacini circolari che costituiscono i mari della crosta lunare.

Probabilmente un nuovo gruppo di corpi celesti viaggiava libero nel sistema solare circa 4 miliardi di anni fa: il risultato è stato l'impatto catastrofico sulla Luna e su altri pianeti. È anche possibile, tuttavia, che l'attività di scavo dei crateri sia stata anche più intensa nel periodo precedente 4 miliardi di anni fa. Forse la storia primordiale della superficie della Luna è stata così violenta che le età delle rocce sono state costantemente modificate e fino a 4 miliardi di anni fa non sono riuscite a trovare un momento di declino dell'attività di impatto tale da lasciarle indisturbate fino a oggi.

Dopo che si è abbattuta questa pioggia di grandi meteoriti o forse anche mentre questa stava semplicemente diminuendo, la Luna è entrata nella quinta fase della sua storia. Durante questo periodo si sono verificate gigantesche eruzioni laviche che hanno inondato la superficie della Luna fuoruscendo dai bacini scavati in precedenza dall'impatto delle meteoriti. In queste zone la lava si è solidificata formando superfici scure che sulla Luna appaiono a occhio nudo come grandi pianure.

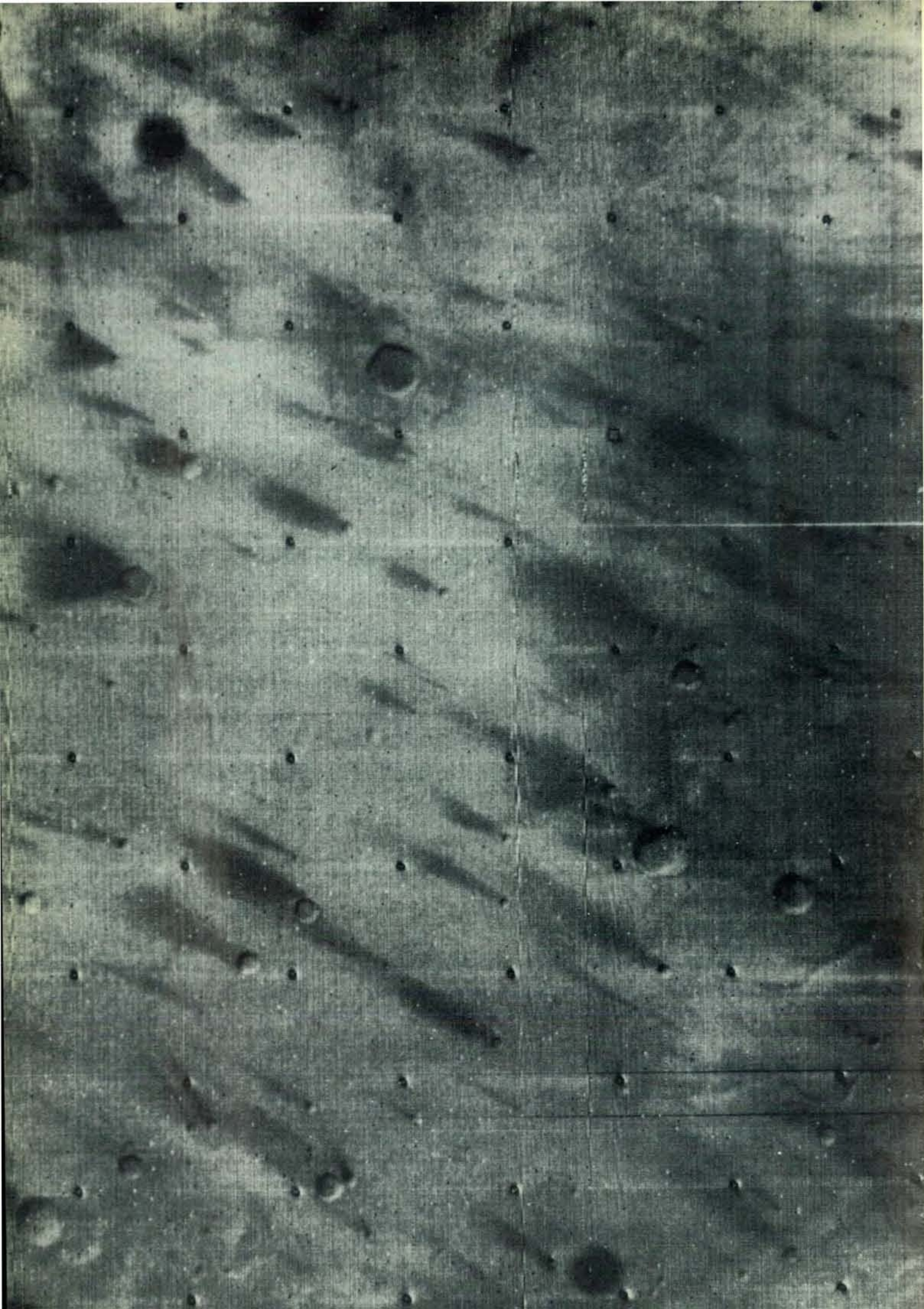
Le lave dei mari lunari non si sono diffuse durante una improvvisa fase vulcanica. Esse hanno continuato a diffondersi dall'interno della Luna per circa un miliardo d'anni. Per questa ragione, le superfici dei mari appaiono come una complicata struttura dovuta alla sovrapposizione di numerose colate laviche (*si veda la figura a pagina 80*).

I basalti lunari che costituiscono i mari sono variabili tanto in composizione quanto in età. I campioni più antichi tendono ad avere il contenuto di titanio più elevato. Sembra che essi siano stati prodotti per fusione parziale a una profondità di 150 chilometri o più e che i basalti meno titaniferi siano stati generati più tardi a profondità maggiori (240 chilometri o più).

Lo stadio finale della storia della Luna è la quiescenza. Nel momento in cui i basalti lunari hanno cominciato a diffondersi sulla superficie, la densità dei più importanti corpi vaganti nel sistema solare era scesa al punto che i grandi impatti avevano smesso di essere un importante contributo all'attività superficiale. Ecco perché i mari lunari sono riusciti a mantenere un aspetto così uniforme fino al giorno d'oggi: essi sembrano ancor più uniformi a distanza; guardandoli da vicino ci si accorge che essi sono interessati da tutto un numero di piccoli crateri determinati dal bombardamento continuo di meteoriti più piccole che sono ancora abbondanti nello spazio.

I disturbi interni così come quelli esterni sono diminuiti nettamente durante l'ultimo capitolo dell'evoluzione lunare. L'involucro di rocce relativamente fredde e rigide – quelle che potremmo nell'insieme chiamare litosfera – sono diventate più spesse a mano a mano che il calore ha continuato a essere perduto dalla superficie del satellite. All'epoca in cui le più giovani rocce basaltiche dei mari venivano eruttate, la litosfera era diventata sufficientemente spessa e forte da resistere al peso delle più vaste colate laviche.

Masse più o meno plastiche di rocce si sono probabilmente disposte in un equilibrio di galleggiamento. Dove questo movimento è stato ostacolato dalla pura e semplice presenza di rocce fredde e rigide, queste masse dense hanno determinato rilievi innaturalmente elevati e anomalie nel campo gravitazionale del satellite. Tali irregolarità sono chiamate anomalie gravimetriche positive. Anche prima del programma Apollo si sapeva che i mari circolari della Luna erano associati ad anomalie gravimetriche positive (mascon).

A questo punto la litosfera lunare deve aver raggiunto uno spessore di circa 1000 chilometri. La profondità della superficie di transizione tra la litosfera rigida e l'astenosfera plastica più interna può essere dedotta dal comportamento delle onde sismiche generate dai terremoti che si riscontrano nelle viscere stesse del nostro satellite (*si veda la figura a pagina 81*). La presenza di uno strato di questo tipo impedisce qualunque forma di fratturazione della litosfera lunare, la separazione di zolle e il trasporto di lava dall'astenosfera fino alla superficie: sono questi processi che sulla Terra continuano incessanti perché la litosfera ha uno spessore non superiore ai 70-150 chilometri. La vitalità della Luna è a questo punto ristretta a un piccolo nucleo centrale. Da tutti i punti di vista è un corpo che – un tempo sede di giganteschi fenomeni termici, chimici e meccanici – oggi si può considerare morto.

Marte

Dalle prime fotografie sembrava un pianeta a crateri morto come la Luna. Dalle riprese più recenti si è visto invece che Marte, almeno nel passato, ha avuto un periodo di vitalità intensa

di James B. Pollack

Nessuna serie di osservazioni effettuate con sonde planetarie ha dato luogo a una revisione profonda delle prime impressioni quanto i gruppi di fotografie di Marte effettuate dai Mariner che hanno ritratto la superficie del pianeta nel 1965, nel 1969 e poi nel 1971. Nel 1965 sono arrivate a Terra 22 fotografie scattate da *Mariner 4;* esse delusero le aspettative di molti perché mostravano la superficie grossolana e ricca di crateri di un pianeta che assomigliava abbastanza alla Luna. Quattro anni più tardi arrivarono 202 immagini complete riprese da *Mariner 6* e *Mariner 7:* da esse affiorò qualche struttura superficiale nuova ma sostanzialmente fu confermata l'impressione che Marte doveva essere un corpo geologicamente morto. Anche se le telecamere a bordo dei Mariner non potevano in ogni caso fornire indizi della presenza di vita su Marte anche se fosse esistita, non vi era nulla nelle fotografie a cui potessero aggrapparsi anche le più tenui speranze degli esobiologi. Se Marte era, come sembrava, un pianeta geologicamente morto, lo era probabilmente anche dal punto di vista biologico.

Solo in seguito però si scoprì che i primi tre Mariner avevano ritratto soltanto una piccola e non rappresentativa porzione della superficie di Marte. Quando nel 1971 *Mariner 9* entrò in orbita attorno a Marte, rivelò che questo era un pianeta con una topografia differenziata in modo spettacoloso e tale da costituire una chiara indicazione di un attivo passato geologico. Le immagini mostrarono giganteschi coni vulcanici, uno dei quali di gran lunga più grande di qualunque altro noto sulla Terra; mostrarono un sistema di profonde valli più esteso del Gran Canyon; un esteso accumulo di sedimenti nelle regioni polari e valli che sembrano essere state scavate da acqua corrente. Secondo questa visione, Marte nel passato deve avere avuto un clima molto diverso da quello odierno. È ora una supposizione lecita che la vita, se per caso ha avuto origine in situazioni climatiche più favorevoli nel passato, possa essere proseguita fino al giorno d'oggi pur in condizioni che possono sembrare ostili. Gli esobiologi potrebbero avere una risposta definitiva tra qualche mese: se tutto va bene, infatti, le prime due sonde automatiche Viking raggiungeranno nell'estate prossima la superficie marziana.

Molti studiosi del XVII, XVIII e XIX secolo hanno creduto che i climi di Marte e Venere potevano essere adatti a ospitare la vita persino di esseri intelligenti. Sembrava soltanto che Venere potesse essere leggermente troppo calda e Marte leggermente troppo freddo ma la semplice temperatura non pareva un ostacolo insormontabile. Già agli inizi del XIX secolo era noto che Marte ruotava sul suo asse in quasi esattamente 24 ore e che lo stesso è inclinato sul piano dell'orbita di circa 24 gradi, cioè quasi esattamente come la Terra. Perciò si riteneva che Marte dovesse essere caratterizzato da una sequenza di stagioni simili a quelle terrestri nell'ambito del suo viaggio annuo di 687 giorni intorno al Sole. Dato che Marte ha un diametro pari a circa la metà di quello terrestre e che la gravità superficiale è circa quattro decimi di quella della Terra, sembrò chiaro ai primi astronomi che l'atmosfera marziana dovesse essere più tenue di quella terrestre; le loro stime, però, variavano ampiamente e la composizione atmosferica reale era ignota.

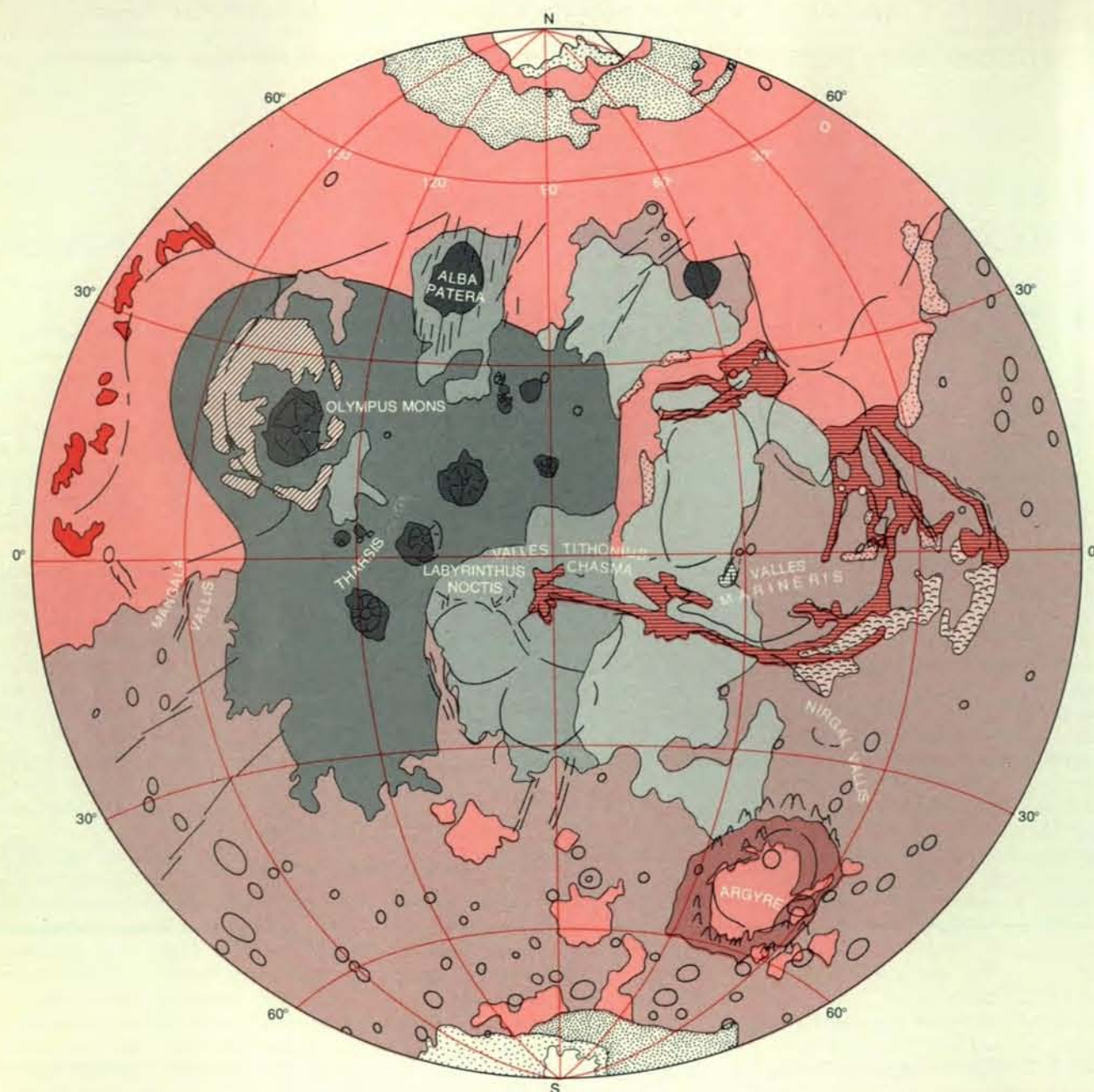
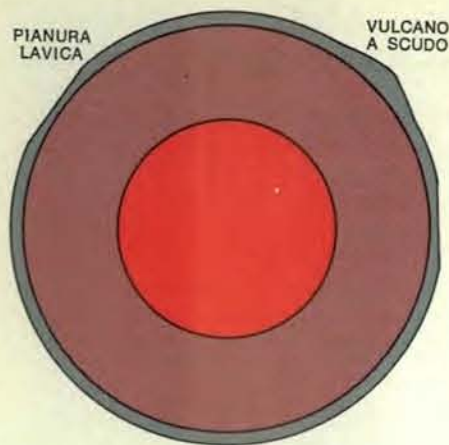
Tutta una serie di generazioni successive di astronomi ha realizzato un numero incalcolabile di mappe di Marte, definendo e ridefinendo senza sosta le collocazioni di tutta una serie di strutture superficiali variabili alle quali essi assegnarono nomi fantastici come *mare, lacus, sinus* (baia o golfo), *lucus* (stagno), *fretum* (stretto o canale) e *palus* (palude). Essi inoltre hanno discusso fino a pochi anni fa della realtà o meno dei famosi canali di Marte.

Nel momento stesso, però, in cui le prime sonde spaziali sono passate accanto a Marte, gli astronomi si sono trovati subito d'accordo su alcune osservazioni specifiche: che l'atmosfera marziana conteneva nuvole; che le bianche calotte polari aumentavano e diminuivano a seconda delle stagioni; che la superficie del pianeta alle varie latitudini spesso mostrava mutamenti stagionali di colore; che il pianeta è periodicamente battuto da intense tempeste di polvere. Una serie di studi spettrografici, condotti negli anni cinquanta e sessanta, dimostrò che l'atmosfera marziana è ricca di anidride carbonica, contiene ben poco vapore acqueo e pressocché niente ossigeno.

Anche in assenza di campioni raccolti sulla superficie, si possono trarre numerose conclusioni a proposito della sua composizione complessiva. La sua densità, per esempio, è soltanto il 70 per cento di quella terrestre. Presumibilmente Marte si è formato in una regione della

I crateri di Marte in questa fotografia, ottenuta dalla sonda *Mariner 9*, hanno ciascuno una coda scura; tutte queste strutture sono allineate fra di loro e sono il risultato dell'azione del vento sul materiale superficiale del pianeta. All'atto in cui il vento soffia oltre i crateri, la sua velocità aumenta sul lato sottovento, rimuovendo le particelle di polvere dal terreno e lasciando queste code scure. I crateri, come quelli di Mercurio, Venere, la Terra e la Luna, sono per lo più dovuti a violenti urti avvenuti all'inizio della storia di Marte quando il pianeta era bombardato da detriti che erano stati lasciati dalla formazione del sistema solare. I crateri marziani, tuttavia, diversamente da quelli di Mercurio e della Luna, sono modificati ed erosi dall'azione dei venti ad alta velocità che caratterizzano l'atmosfera del pianeta, come appare chiaro dalla foto.

nebulosa solare che era abbastanza fredda da permettere la condensazione di composti che comprendevano una gran varietà di elementi chimici. Il pianeta è probabilmente ben fornito di minerali contenenti composti di magnesio, ferro, silicio e ossigeno (silicati ferromagnesiaci) e di ferro e zolfo insieme (troilite). Deve inoltre esserci anche del ferro libero. Siccome Marte si è formato in una regione della nebulosa solare primitiva più fredda di quella in cui si è formata la Terra, tanto maggiore è la quantità di ferro combinatasi con altri elementi e tanto minore è quella sprofondata al centro del pianeta a costituire un nucleo metallico. Questo particolare può spiegare perché Marte ha una densità inferiore a quella terrestre. Anche le condizioni di temperatura hanno favorito la formazione di una certa quantità di materiali silicatici contenenti acqua. Inoltre, Marte contiene anche composti che comprendono piccole quantità di isotopi radioattivi a vita lunga di uranio, torio e potassio.

Assai meno massiccio della Terra, Marte, con ogni evidenza, si è formato assai rapidamente, forse in meno di 100 000 anni. Tanto più rapida è la formazione di un pianeta, tanto più grande è la parte di energia gravitazionale che esso può inglobare e quindi tanto più caldo esso sarà alla fine del periodo di aggregazione. Per di più, gli strati esterni sono riscaldati a temperature più elevate di quelli interni. I normali modelli teorici della Terra e della Luna indicano che entrambi questi corpi celesti hanno avuto temperature iniziali elevate e che entrambi devono essersi formati rapidamente. Lo stesso deve essere accaduto

In questa mappa sono mostrate le strutture geologiche di Marte rispetto a latitudine e longitudine del pianeta. È indicata qui la localizzazione di ciascuna delle strutture menzionate nel testo. L'emisfero settentrionale di Marte ha numerosi vulcani recenti; la crosta dell'emisfero meridionale è più antica e più profondamente interessata da crateri. Le calotte di ghiaccio permanenti sono costituite prevalentemente da ghiaccio d'acqua che si forma al di sopra del terreno stratificato; le calotte di ghiaccio stagionali sono costituite da ghiaccio secco. Il terreno stratificato, chiamato anche terreno laminato, è una zona relativamente giovane che si trova in prossimità dei poli e nella quale una serie di accumuli successivi di polveri e di ghiaccio sono andati succedendosi nel tempo. Le strutture vulcaniche sono costituite in larga misura da scudi, duomi o coni. Le pianure vulcaniche hanno pochi crateri e molte scarpate lobate che sembrano rappresentare i fronti di colate laviche solidificate. Le zone con una quantità moderata di crateri mancano di strutture vulcaniche. Le zone indicate in legenda come pianure ricche di crateri sono, ovviamente, quelle più craterizzate di tutto il pianeta e comprendono regioni simili a quelle dei mari lunari. Il terreno caotico è costituito da un'area depressa che contiene una gran quantità di blocchi spaccati e rovesciati della crosta marziana. Il terreno tormentato è una regione del bassopiano con numerosi rilievi a cima piatta delimitati da scarpate. Il terreno collinoso è una regione a colline, ciascuna del diametro di circa 10 chilometri. I depositi vallivi e i depositi lisci delle valli e dei canyon sono probabilmente costituiti da materiali depositati dall'acqua, dal vento e dalle frane. Le pianure senza ulteriori specificazioni hanno in genere un aspetto irregolare, ricco di dorsali, scarpate e valli oltreché di crateri sparsi. Il terreno a solchi è una zona di montagna prossima al Monte Olympus che ha un'ampiezza compresa tra 1 e 5 chilometri e si estende su un arco della lunghezza di un centinaio di chilometri. Quello che in legenda è chiamato terreno a crateri non suddiviso è una regione da densamente a moderatamente craterizzata e costituisce la parte più antica della superficie esposta di Marte. Il terreno montagnoso è l'area irregolare adiacente al bacino. Probabilmente è costituito da materiale che è stato espulso dall'impatto originario che ha formato il bacino e che successivamente è stato eroso.

Questa sezione trasversale di Marte mostra come il pianeta possa essersi differenziato dopo l'accrezione dalla nebulosa che ha dato origine a tutto il sistema solare. La crosta (*grigio*) è ricca di alluminio e silicio e manca invece di magnesio. Il decadimento di elementi radioattivi a lunga vita ha riscaldato l'interno del pianeta fino a che il ferro metallico e la troilite (solfuro di ferro) non sono fusi e non si sono concentrati al centro del pianeta per diventarne il nucleo (*colore intenso*) e il mantello (*colore intermedio*) di silicati ferromagnesiaci. Lungo la storia geologica di Marte, una certa quantità di magmi leggeri ha raggiunto la superficie, soprattutto nell'emisfero settentrionale, e si è riversata in superficie a costruire strutture vulcaniche oltre che vaste pianure.

per Marte. I due satelliti di Marte, Phobos e Deimos, sembrano essersi formati alle più esterne propaggini dell'anello di detriti dal quale deve essere nato il pianeta.

Alla fine del periodo di aggregazione, Marte ha avuto una composizione omogenea e nessuna atmosfera. Gli strati più esterni che erano fusi immediatamente dopo la formazione, si sono raffreddati e solidificati a formare una certa varietà di tipi rocciosi diversi. Le rocce più leggere, che erano più ricche di silicio e alluminio e povere di magnesio, galleggiarono fino a raggiungere la superficie della sfera dove formarono la crosta del pianeta, il cui spessore è di circa 50 chilometri. Il riscaldamento successivo dell'interno, causato dal decadimento di isotopi radioattivi a lunga vita, ha condotto alla ulteriore differenziazione chimica del pianeta. L'interno si differenziò in accordo con la densità dei suoi componenti mentre gas e composti volatili affiorarono in superficie a formare l'atmosfera. Ma si possono distinguere altri due stadi principali in questo processo di differenziazione.

Nel primo le temperature interne erano diventate abbastanza alte da far sì che miscele di ferro e troilite fondessero e sprofondassero fino al centro del pianeta a formare un nucleo di materiali ferrosi. In seguito a questa risistemazione principale, Marte aumentò leggermente di dimensioni e la sua superficie primordiale fu totalmente distrutta. La prova del fatto che Marte deve avere un nucleo denso e pesante è stata fornita da misure accurate del campo gravitazionale del pianeta effettuate dalla serie di missioni Mariner.

Il secondo stadio nella differenziazione ha avuto luogo poco più di un miliardo di anni dopo il primo, quando le temperature sono diventate abbastanza alte negli strati esterni di Marte da fondere una parte del materiale roccioso che si trovava nel mantello al di sopra del nucleo. Nel processo una parte del mantello si è differenziata in un materiale roccioso più leggero, ricco in silicio e alluminio, e in un materiale, invece, impoverito di questi due elementi. Il materiale più leggero si è concentrato alla superficie dove ha generato pianure e strutture vulcaniche. Il vulcanismo ha continuato la sua attività episodicamente fino a oggi e la superficie superiore della zona fusa si è progressivamente spostata verso profondità sempre maggiori.

Anche la fusione dell'interno ha portato allo sviluppo di una atmosfera. Quando una roccia viene riscaldata, perde alcuni degli elementi che ha assorbito sulla sua superficie; per esempio, i gas nobili neo e argo. Nello stesso tempo alcuni degli elementi o delle molecole, come l'acqua, che erano stati incorporati nelle rocce, vengono liberati. Molti dei gas, dopo essersi liberati in questo modo, si ricombinano a formare composti termodinamicamente stabili. Il carbonio si ricombinerà con l'ossigeno a formare anidride carbonica e con l'idrogeno a formare metano. L'effetto finale della fusione dell'interno del pianeta è l'introduzione di gas nobili, vapore acqueo, anidride carbonica, metano, azoto e idrogeno nell'atmosfera. La composizione finale dell'atmosfera, tuttavia, è determinata dalla successiva perdita parziale di alcuni di questi gas e dalle reazioni chimiche tra gli uni e gli altri.

Su Marte, una frazione sensibile del vapore acqueo liberatosi e notevoli quantità di anidride carbonica si sono condensati sotto forma di ghiacci nelle regioni polari oppure sono stati assorbiti sulla superficie dalle particelle di polvere che ricoprono il terreno. Il campo gravitazionale marziano, come quello terrestre, non è forte abbastanza da trattenere il gas più leggero, l'idrogeno, e da impedirgli di sfuggire verso l'esterno.

La composizione della prima atmosfera del pianeta dipendeva largamente dalla concentrazione delle molecole di idrogeno nella sua porzione inferiore. Se il ritmo di degassazione era elevato e la velocità con cui l'idrogeno lasciava il pianeta era bassa, nell'atmosfera deve essere rimasto idrogeno in quantità e per tempi sufficienti a ridurre la maggior parte dell'anidride carbonica in metano e vapore acqueo. In tempi successivi durante l'evoluzione del pianeta, il ritmo di degassazione potrebbe essere diminuito improvvisamente, mentre si abbassava contemporaneamente il contenuto di idrogeno dell'atmosfera. A questo punto l'anidride carbonica dovrebbe essere piano piano affiorata come costituente principale dell'atmosfera. Più avanti in questo articolo esamineremo le conseguenze di una atmosfera primitiva riducente a proposito dei mutamenti climatici su Marte e della possibile evoluzione della vita sul pianeta.

Ora noi sappiamo, dalle misure rese possibili dalle sonde Mariner, che l'atmosfera di Marte è molto esile: la sua pressione in superficie è pari soltanto a due centesimi di quella dell'atmosfera terrestre alla superficie del mare. Anche se l'atmosfera è costituita soprattutto di anidride carbonica, essa può anche contenere una quantità sorprendentemente elevata di argo, forse addirittura più del 30 per cento. Ossido di carbonio e ossigeno insieme formano non più dello 0,1 per cento dell'atmosfera mentre la quantità di vapore acqueo è variabile ma si aggira in media attorno allo 0,01 per cento. Certamente presenti, inoltre, sono l'ozono (una parte per milione) e l'idrogeno atomico e molecolare in traccia.

Una larga quantità dell'anidride carbonica atmosferica, forse da un sesto a un quarto, condensa una volta all'anno nell'emisfero invernale, vaporizza in primavera e congela di nuovo nell'emisfero opposto. Si formano così le calotte polari che ai loro massimi stagionali scendono dai poli fino a una latitudine di circa 60 gradi. Grandi quantità di anidride carbonica possono inoltre essere assorbite dalle particelle del suolo e forse, anche se questo ora sembra abbastanza improbabile, essere intrappolate a costituire calotte polari permanenti.

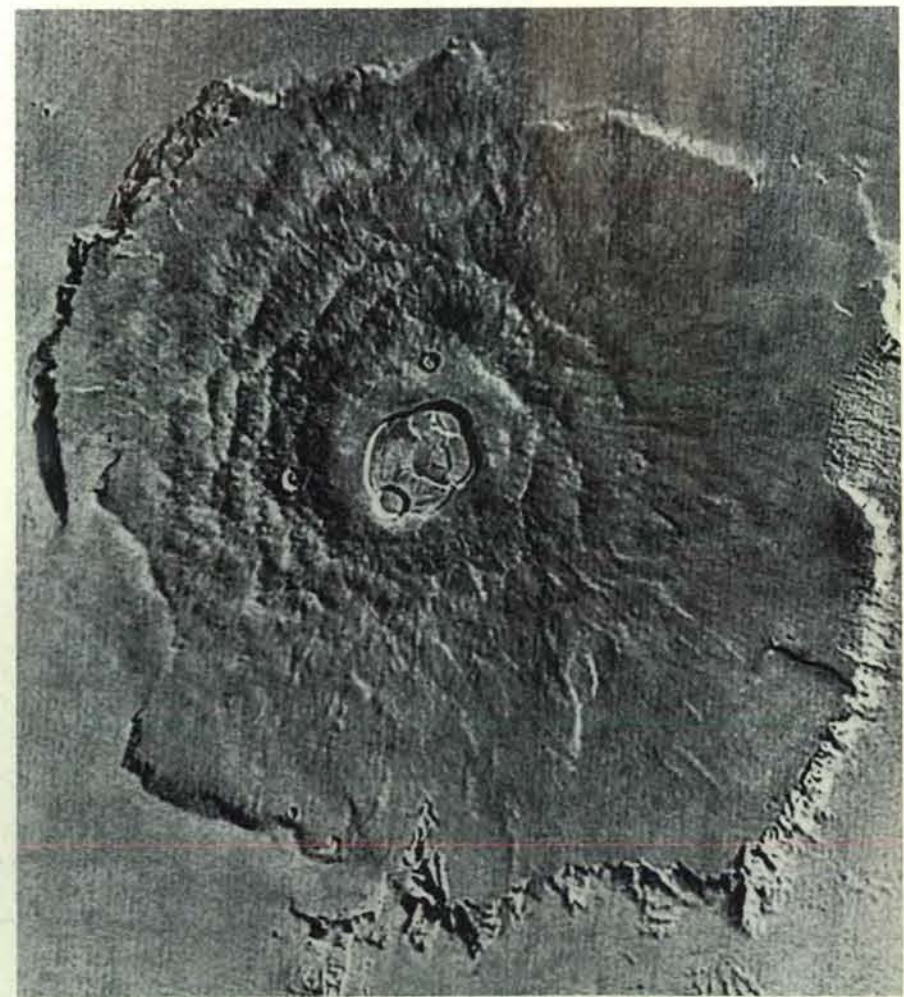
La quantità di vapore acqueo libero nell'atmosfera di Marte è anche più strettamente limitata dai processi di condensazione e assorbimento. Poiché il ghiaccio d'acqua condensa a una temperatura più elevata che non l'anidride carbonica (190 kelvin contro 150), esso forma in entrambi gli emisferi piccole ma permanenti calotte polari. Inoltre, una gran quantità d'acqua è probabilmente intrappolata a tutte le latitudini nel regolite, il materiale granulare che giace al di sotto delle rocce vere e proprie. Da osservazioni nell'infrarosso compiute da aerei d'alta quota dell'Ames Research Center della NASA, James R. Houck della Cornell University e io ci siamo convinti che l'acqua di combinazione è presente ovunque su Marte e costituisce circa l'1 per cento del materiale superficiale. Quest'acqua può essere presente in tutto il materasso regolitico che è profondo più di un chilometro. Per di più, a latitudini superiori ai 45 gradi, il terreno al di sotto della superficie è freddo abbastanza per tutto l'anno da costringere il vapor d'acqua atmosferico a condensare e a formare strati di ghiaccio sotterranei analoghi al permafrost che si osserva sulla Terra nelle regioni circumpolari.

Praticamente, tutta l'acqua di Marte è concentrata nelle calotte polari, nel permafrost e nel regolite. Se tutta l'acqua che rimane nell'atmosfera dovesse condensare, essa coprirebbe la superficie del pianeta con una pellicola sottile soltanto pochi centesimi di millimetro. Se l'acqua delle calotte polari fosse invece distribuita su tutta la superficie del pianeta, essa produrrebbe uno strato della profondità di 10 metri, mentre un ugual volume d'acqua si potrebbe a quel punto ottenere dal permafrost e dal regolite.

Se la quantità di argo nell'atmosfera marziana è alta tanto quanto hanno suggerito le recenti osservazioni compiute da sonde russe, le quantità di anidride carbonica e vapore acqueo generatesi simultaneamente dall'interno del pianeta devono essere state molto elevate. L'argo costituisce circa l'1 per cento dell'atmosfera terrestre e deve la sua origine quasi totalmente al decadimento del potassio radioattivo presente all'interno della Terra. Se si tiene conto della quantità di anidride carbonica oggi contenuta nelle rocce carbonatiche e della quantità d'acqua contenuta negli oceani, si trova che a suo tempo dall'interno della Terra devono essere fuoruscite quantità di anidride carbonica e di vapore acqueo rispettivamente 2000 e 40 000 volte superiori a quelle dell'argo.

Dunque, se l'argo costituisce qualche decimo dell'attuale atmosfera marziana, ciò significa che notevoli quantità di anidride carbonica devono essere contenute nel regolite del pianeta e quantità d'acqua ancora più grandi devono essere presenti nelle calotte polari, nel regolite e nel sottosuolo: quantità anche più grandi di quelle stimate più sopra.

Tutti i gas in traccia che sono stati individuati finora nell'atmosfera marziana, e cioè ossido di carbonio, ossigeno, ozono e idrogeno, si sono evidentemente formati da processi fotochimici per scomposizione di anidride carbonica e vapor d'acqua. La radiazione ultravioletta proveniente dal Sole, infatti, scompone queste sostanze in frammenti molecolari che poi reagiscono gli uni con gli altri e con altre molecole d'acqua o di anidride carbonica. Gli spettrometri all'ultravioletto posti a bordo delle sonde Mariner hanno osservato direttamente l'abbondanza di atomi di idrogeno presso la esosfera o l'atmosfera più esterna di Marte per mezzo della quantità di luce solare che essi diffondono. Questo ha reso possibile la stima della velocità con cui gli atomi di idrogeno stanno sfuggendo oggi all'atmosfera marziana. Se questa velocità è tipica ed è stata sempre la stessa durante tutta la vita del pianeta, ciò significherebbe semplicemente che in questo periodo di tempo è stata distrutta una quantità d'acqua sufficiente a coprire il pianeta per uno spessore di diversi metri.

Originariamente si pensava che l'ossigeno liberato dalla scissione fotochimica dell'acqua e la contemporanea fuga dell'idrogeno dovessero determinare come conseguenza la reazione dell'ossigeno con le rocce della crosta marziana per produrre minerali altamente ossidati. Michael B. McElroy della Harvard University ha suggerito, tuttavia, che possano verificarsi, presso l'esosfera, processi fotochimici tali da liberare atomi di ossigeno dotati di una velocità sufficiente a consentir loro di sfuggire nello spazio. Questo accadrebbe quando qualche frammento molecolare ionizzato che incorporasse atomi di ossigeno si combinasse con elettroni per produrre frammenti molecolari non ionizzati. Parte dell'energia generata dalla trasformazione chimica si trasformerebbe allora in energia cinetica. Sorprendentemente, la quantità di ossigeno, che sfuggirebbe in seguito a questo processo, sembrerebbe comparabile alla quantità di idrogeno che segue la stessa sorte. Sembra probabile che la quantità di questi due tipi di atomi che vengono perduti nello spazio sia proporzionale alla loro abbondanza relativa nell'acqua (e cioè 2 atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno) e che

Questo è il Monte Olympus, un tempo noto come Nix Olympica, un gigantesco vulcano a scudo del diametro di circa 600 chilometri. La sua vetta raggiunge un'altezza di 25 chilometri al di sopra della pianura circostante. Le caldere, cioè le strutture circolari più piccole in prossimità del centro, erano un tempo i condotti attraverso i quali la lava fusa fuorusciva e scendeva lungo i fianchi del vulcano: la struttura radiale ancora ben visibile ne è una conseguenza. Alla fine di ciascun periodo eruttivo la lava si abbassava al di sotto dei condotti e la superficie, non più sostenuta, crollava a formare le caldere. La scarpata lungo il bordo esterno è alta circa 2 chilometri.

non siano presenti prodotti di rifiuto.

Il meccanismo fotochimico per produrre atomi abbastanza veloci da sfuggire alla nostra atmosfera può anche essere efficace per atomi di azoto e di carbonio. Questo può spiegare l'assenza quasi assoluta di azoto molecolare nella attuale atmosfera marziana, particolarmente se la maggior parte del fenomeno di degassazione che ha dato origine ai costituenti dell'atmosfera è avvenuto ai primordi della storia del pianeta. Gli atomi di carbonio, perduti nello spazio tramite lo stesso processo, avrebbero dato origine, lungo tutta la vita di Marte, a una quantità di anidride carbonica quasi uguale a quella ora presente nell'atmosfera marziana.

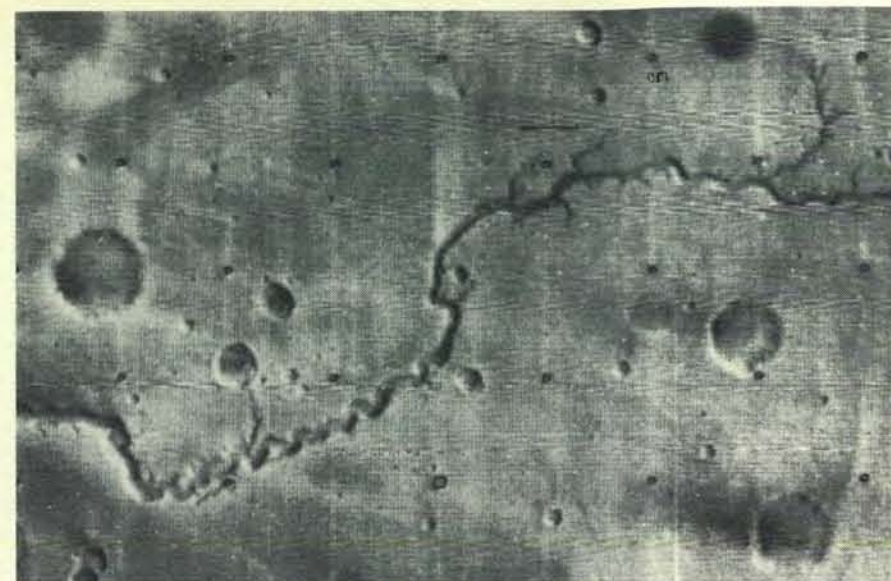
Le piccole quantità di ozono trovate nell'atmosfera di Marte sono generate nella sua parte bassa attraverso la combinazione chimica dell'ossigeno molecolare e atomico prodotti dalle reazioni fotochimiche nell'alta atmosfera. L'ozono si trova in quantità misurabili soltanto nelle regioni polari durante l'inverno, quando la temperatura dell'aria è abbastanza bassa da congelare la maggior parte del vapore acqueo. Quando il vapore acqueo è presente, i prodotti della sua fotodissociazione reagiscono con l'ozono e determinano la sua rapida scomparsa. Gli studi sul ciclo dell'ozono marziano possono condurre a una migliore comprensione dei processi che controllano la quantità di ozono nell'atmosfera terrestre che agisce da scudo nel proteggere la vita dalle pericolose radiazioni ultraviolette provenienti dal Sole.

Malgrado l'esilità dell'atmosfera marziana vengono di frequente osservate sia nubi di condensazione sia nubi di polvere. Quando l'anidride carbonica sta condensando sul terreno nelle regioni polari durante l'inverno, spesso si sviluppano nubi di vario tipo. Alle medie latitudini nello stesso emisfero la temperatura dell'aria scende al di sotto dei 190 kelvin e il vapore acqueo condensa a dare nubi di minuscoli cristalli di ghiaccio. Più in prossimità del polo, le temperature dell'aria raggiungono il punto di condensazione dell'anidride carbonica e cioè 150 kelvin: così si formano nubi di ghiaccio secco. L'andamento di queste nubi spesso cambia di giorno in giorno.

Le telecamere a bordo di *Mariner 9* hanno ripreso, nelle zone polari, interessanti sistemi nuvolosi. In un certo numero di occasioni le nubi formavano un'evidente ondulazione sottovento a qualche grande cratere. Il flusso d'aria al di sopra del bordo del cratere determina la nascita sottovento a esso di una serie di nubi orografiche. Tali nubi, sulla Terra, sono comuni sul lato sottovento delle catene montuose: quando l'aria sta salendo in quota, si espande e raffredda; in essa dunque si generano nubi di cristalli di ghiaccio a intervalli regolari.

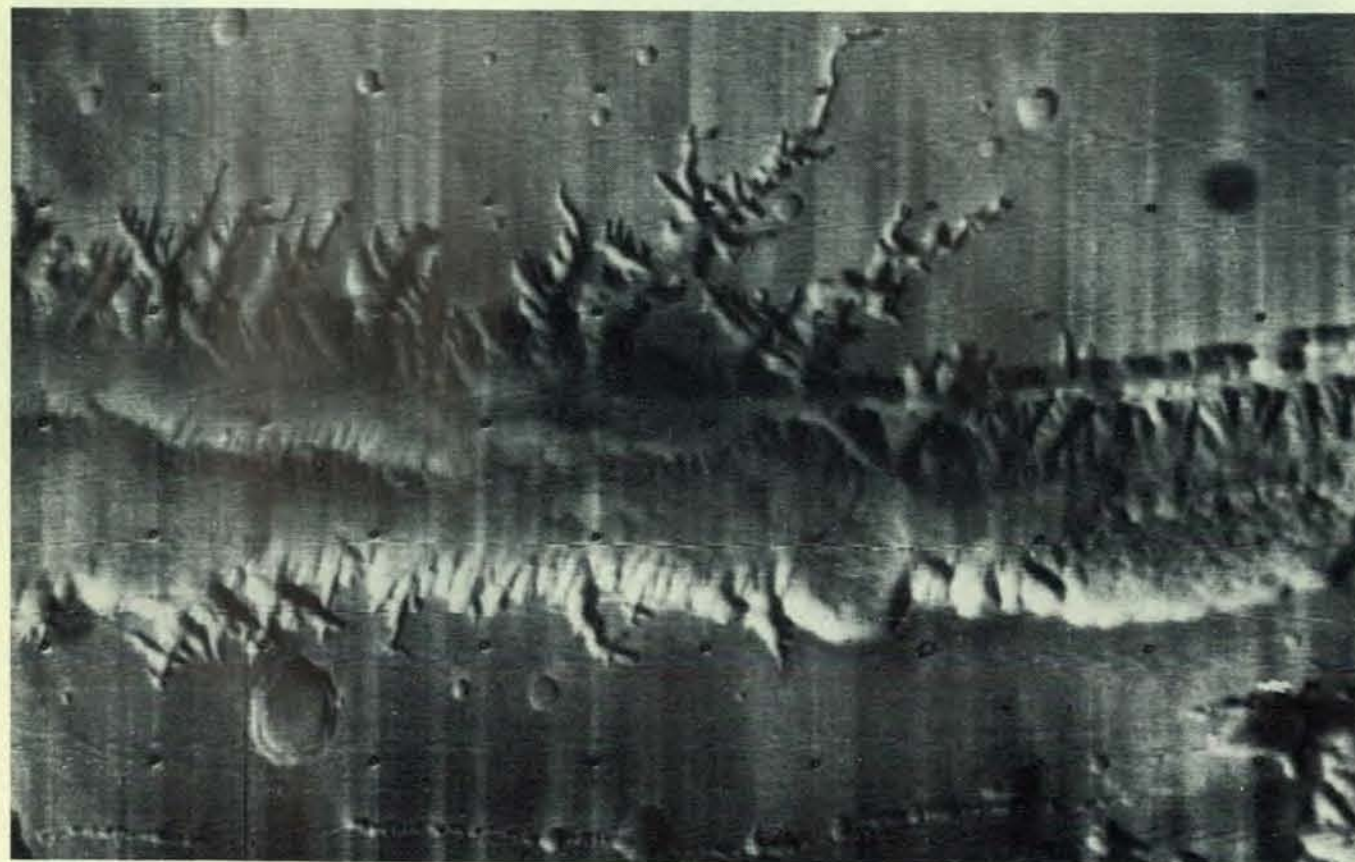
Talvolta su Marte a latitudini più prossime all'equatore, si trovano nubi di condensazione localizzate. Esse sono formate dalla risalita e raffreddamento dell'aria al di sopra di strutture superficiali notevolmente elevate, come i grandi edifici vulcanici posti nella regione Tharsis o presso di essa. Le nubi normalmente diventano via via più chiare mano a mano che il giorno avanza dal primo mattino fino al tardo pomeriggio. Esse sono più frequenti durante l'estate quando il contenuto d'acqua dell'atmosfera è elevato. Gli spettrografi all'infrarosso a bordo di *Mariner 9* hanno dimostrato che le nubi assorbono la lunghezza d'onda spettrale caratteristica del ghiaccio d'acqua.

Le tempeste di polvere di entità locale sono frequenti su Marte. Oltre a queste però, una grande tempesta, ogni anno, si sviluppa fino a coprire una larga parte del pianeta. La tempesta comincia improvvisamente sotto forma di una struttura brillante, bianca e allungata, che ha un fronte di diverse migliaia di chilometri. Normalmente essa inizia a una latitudine di circa 30 gradi sud e 320 gradi ovest nella parte nordorientale della regione Noachis in prossimità del suo confine con il grande bacino di Hellas. La tempesta di polvere comincia alla fine di primavera nell'emisfero meridionale quando Marte è prossimo al perielio, cioè al punto della sua orbita più vicino al Sole. Per i primi giorni la nube di polvere centrale si espande molto lentamente. Dopo di che essa aumenta rapidamente e si allunga soprattutto in direzione ovest: nell'arco di qualche settimana essa avvolge tutto il pianeta. Nello stesso tempo, lingue di questa tempesta di polvere si sviluppano e si espandono verso latitudini più alte o più basse, mentre tempeste locali iniziano in altri punti dell'emisfero meridionale e piccole quantità di polvere vengono portate alle altre latitudini. Nel giro di un mese, dopo l'inizio della tempesta, la nube copre quasi tutto l'emisfero meridionale. Talvolta, - e questo è accaduto nel 1971 quando *Mariner 9* è entrato in orbita attorno al pianeta - la tempesta di polvere si espande anche nell'emisfero settentrionale e l'intero pianeta si nasconde al di sotto di una nube continua di polvere. Ma poi la tempesta si placa e le particelle di polvere cominciano a scendere attraverso l'atmosfera: nell'arco di uno o più mesi l'atmosfera torna nuovamente a essere trasparente.

Per mettere in movimento particelle di polvere e portarle fino a grandi altezze nell'atmosfera, sono necessari venti con velocità superiori ai 150 chilometri orari. Una grande tempesta di polvere comincia o perché si sono sviluppati su scala globale venti molto violenti, oppure perché i venti su grande scala sono sufficientemente calmi da favorire lo sviluppo di una struttura locale di venti a percorso spiraleggiante, analoga alle trombe d'aria terrestri. Una volta che la polvere è sollevata e iniettata nell'atmosfera, può svilupparsi un sistema circolare di venti organizzati del diametro di un migliaio di chilometri, assai simili agli uragani terrestri. In un uragano terrestre il calore necessario per guidare i forti venti è fornito dalla condensazione del vapore acqueo in prossimità dell'occhio del ciclone. Nell'ipotetico uragano marziano il calore è fornito dalla luce solare che è assorbita dalle particelle di polvere che allora riscaldano il gas circostante. Il sollevamento del gas riscaldato porta con sé piccole particelle di polvere fino ad altitudini superiori ai 50 chilometri. Il risultato del forte contrasto di temperatura tra l'aria riscaldata e quella circostante più fredda è che, in prossimità della periferia della tempesta di polvere, si producono venti che sollevano continuamente nuova polvere. In questo modo la tempesta cresce. Quando la polvere copre l'intero pianeta, le differenze di temperatura diminuiscono notevolmente e quindi i venti si smorzano e le particelle di polvere tornano a posarsi sul terreno.

La superficie di Marte è il prodotto di una varietà di processi che hanno determinato una serie di forme geologicamente assai diverse. Questi processi sono rappresentati dal bombardamento superficiale da parte di meteoriti, dall'attività vulcanica e tettonica, dall'azione delle acque correnti e del vento.

Quando una meteorite entra in collisione con Marte a una tipica velocità di 10 chilometri al secondo, determina un cratere il cui diametro è circa 10-20 volte più grande di quello del corpo stesso. Nel primo miliardo di anni dell'evoluzione del sistema solare, il ritmo di generazione di crateri è stato molto più elevato di quello attuale. I corpi responsabili della genesi dei primi crateri erano sia resti non utilizzati della formazione del pianeta e dei suoi satelliti, sia oggetti che si sono formati nella parte più esterna della fascia degli asteroidi e sono stati indotti a entrare in una orbita transmarziana per l'interazione gravitazionale con Giove. Di solito, i corpi piccoli che entrano in collisione con Marte sono derivati da comete e asteroidi.

Un cratere d'impatto recente, il cui diametro sia inferiore ai 10 chilometri, ha un profilo trasversale tondeggiante, un orlo ben delineato e un panorama collinoso circostante derivato dall'accumulo del materiale espulso dal cratere. Normalmente i crateri di dimensioni più grandi hanno un picco centrale mentre i crateri di diametro superiore ai 250 chilometri hanno per lo più una serie di orli concentrici rialzati. Vi è una netta differenza nelle densità di crateri di diametro superiore ai 10 chilometri tra l'emisfero meridionale e quello settentrionale: il primo ne ha molti di più del secondo. Evidentemente i terreni più densamente interessati da crateri nell'emisfero meridionale sono superfici molto più antiche di quelle dell'emisfero settentrionale. La maggior parte dell'emisfero settentrionale è stato invaso da lava che ha obliterato i crateri che un tempo dovevano essere presenti anche là. È un fatto curioso che anche molti altri corpi del sistema solare, quali la Terra e la Luna, si sono sviluppati in modo asimmetrico.

Da stime dell'attuale ritmo di formazione di crateri su Marte, noi possiamo dedurre che la maggior parte dei grandi crateri nell'emisfero meridionale sono nati nella prima parte della storia del pianeta, probabilmente nel primo miliardo di anni. Durante questo primo periodo di intenso bombardamento, Marte occasionalmente entrava in collisione con meteoriti veramente grandi. Gli impatti creavano grandi bacini entro o presso l'emisfero meridionale: di questo tipo sono Hellas (45 gradi sud, 290 ovest), Argyre (50 gradi sud, 45 ovest), e Iside (15 gradi nord, 270 ovest). Il più largo di tutti, Hellas, ha un diametro di circa 2000 chilometri e una profondità di circa 4.

Ecco il Tithonius Chasma, un canyon enorme, largo circa 75 chilometri e profondo parecchi chilometri. Esso fa parte del sistema complesso detto Valles Marineris che può essere nato quando la superficie di Marte è andata incontro a fratturazione e quando il materiale fuso al di sotto della superficie si è abbassato o quando ancora il ghiaccio contenuto nel terreno si è fuso, dando luogo, in alcuni casi, ad acqua superficiale che ha spazzato parte del materiale. La struttura dendritica, nella parte alta di questa foto, e il gruppo intricato di dorsali all'interno del canyon stesso possono essersi formati proprio per l'attività di acqua allo stato liquido. L'allineamento di crateri in basso può rappresentare un canyon al primo stadio di sviluppo.

Un canale sinuoso con un sistema di affluenti ancora immaturo: sembra essere stato creato da acqua superficiale o da qualche altro fluido meno viscoso della lava. Il canale, chiamato Nirgal Vallis (29 gradi sud, 40 ovest), è lungo circa 1000 chilometri.

Dallo stato di conservazione dei crateri in varie regioni di Marte, è possibile dedurre la velocità con cui i diversi crateri vanno incontro a modificazioni e degradazione nel corso della storia del pianeta. I grandi crateri nell'emisfero meridionale variano ampiamente per quanto concerne il loro specifico stato di degradazione. Quasi tutti i crateri sulle pianure vulcaniche dell'emisfero settentrionale, tuttavia, hanno un aspetto recente. Questa differenza suggerisce che la velocità di degradazione dei crateri era molto più elevata ai primordi della storia marziana quando i grandi crateri meridionali si stavano formando, piuttosto che non più tardi quando si sono formate le prime pianure vulcaniche. Studi dettagliati sulla morfologia dei crateri mostrano che verso la fine dell'epoca di craterizzazione iniziale, la velocità della degradazione dei crateri stessi è aumentata rapidamente. Il periodo di erosione più accentuato si è verificato più o meno in coincidenza del tempo in cui ha avuto luogo la formazione delle più antiche pianure vulcaniche.

La fusione di rocce nell'interno di Marte ha dato luogo a due tipi di forme vulcaniche: le grandi pianure vulcaniche e gli edifici a cono. La ragione per cui le effusioni laviche hanno avuto luogo in preferenza nell'emisfero settentrionale è in parte quella che questo emisfero si estende in larga misura per diversi chilometri al di sotto del livello medio dell'emisfero meridionale. La pianura lavica ha una stretta rassomiglianza con quelle note sulla Luna col nome di mari. Il flusso della lava attraverso queste pianure ha generato diverse dorsali. Il fronte di ciascuna colata è caratterizzato da lunghe scarpate con lobi scarsamente accentuati. Alcune aree delle pianure vulcaniche settentrionali sono sforacchiate da un numero di crateri più di 10 volte superiore a quello delle zone adiacenti. Questa netta variazione implica che la colata lavica deve essere avvenuta episodicamente nel corso di un lungo intervallo di tempo che si estende dalla formazione della prima regione vulcanica, avvenuta più di un miliardo di anni fa, fino ad arrivare al giorno d'oggi.

Tra le più evidenti strutture della superficie marziana vi sono enormi vulcani a scudo che hanno un diametro di centinaia di chilometri e che sono più alti di qualunque montagna terrestre. Il più giovane e il più grande è il monte Olympus (*si veda la figura a pagina 91*), che ha un diametro di circa 600 chilometri e cioè tre volte più grande del suo più prossimo equivalente terrestre, il Mauna Loa delle Hawaii. La vetta del monte Olympus si innalza per 25 chilometri al di sopra del terreno circostante, cioè due volte e mezzo l'altezza del Monte Everest al di sopra del livello del mare. In prossimità della vetta del gigantesco scudo vi è un complesso sistema di caldere, cioè di strutture da collasso che un tempo erano canali di emissione della lava. I fianchi del monte Olympus mostrano una struttura grossolana caratterizzata da numerosi lobi allungati radialmente e canali di lava residui che sono stati creati durante gli ultimi periodi di edificazione dello scudo. Il bordo dello scudo è segnato da una scarpata che ha un'altezza di circa 2 chilometri: presumibilmente, si tratta di una scarpata formatasi per processi erosivi che sono stati attivi dopo la formazione stessa dello scudo.

Vi sono altri tre prominenti vulcani a scudo prossimi al monte Olympus: tutti sono localizzati sulla dorsale Tharsis (0 gradi di latitudine, 115 gradi ovest) e si sono formati dopo la nascita stessa della dorsale. A nord di essi si trova uno scudo molto più degradato il cui nome è Alba Patera. Altri scudi meno prominenti sono anche visibili nella più antica ed elevata regione Elysium (20 gradi nord, 210 ovest). Se si postula che i vulcani a scudo marziani siano cresciuti con la stessa velocità dei vulcani terrestri, per costruire ciascuno dei più grandi fra essi sono stati necessari circa 100 milioni di anni. La edificazione degli scudi non è avvenuta contemporaneamente anche nella regione Tharsis ma si è verificata in un tempo nettamente più lungo di quello necessario a edificare ciascun vulcano.

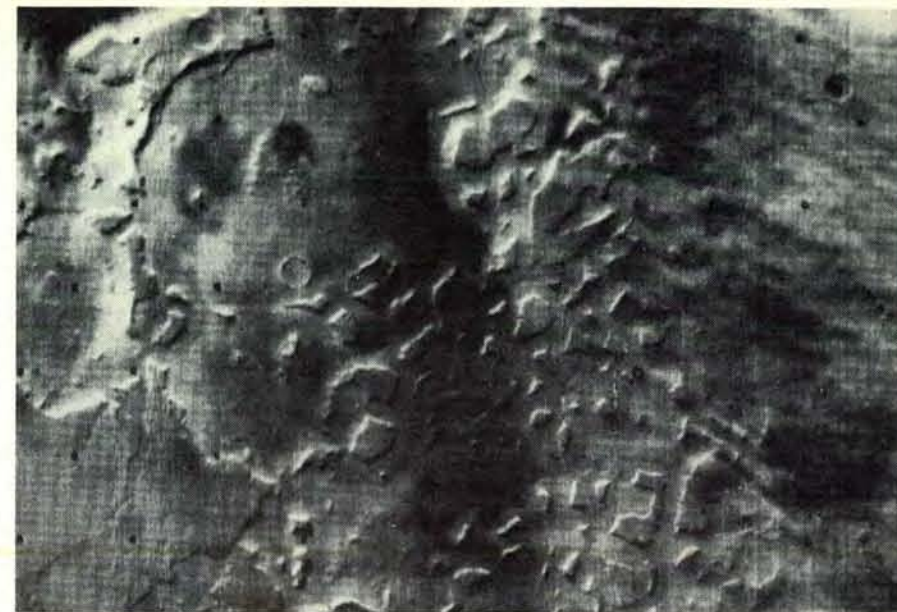
Nelle foto riprese dai Mariner può essere identificato anche un certo numero di duomi vulcanici più piccoli del diametro di circa un centinaio di chilometri. I duomi hanno versanti più pendenti che non i vulcani a scudo e si sono probabilmente formati da lave più viscose. A scala ancora più piccola vi sono crateri vulcanici con contorni ben individuati e orli morbidi ma ben sviluppati.

Sembra che la maggior parte dei vulcani a scudo si sia formata dopo e in parte come risultato dell'attività tettonica che ha creato le aree più elevate. In coincidenza con la formazione di questi altopiani, si sono formate numerose fratture nella superficie del pianeta. La più evidente di queste è comparsa nella regione Labyrinthus Noctis (5 gradi sud, 100 ovest), dove ha dislocato la superficie per circa 10 chilometri. Questa area elevata che si estende per migliaia di chilometri è evoluta in modo asimmetrico con l'emergenza di una dorsale abbastanza netta nella regione Tharsis dove il terreno è stato sottoposto a sforzi più intensi che non altrove. La presenza di questi sforzi supplementari può giustificare lo sviluppo dei tre vulcani più elevati della regione Tharsis. Il sollevamento della regione Tharsis, che può essere stato generato dalla risalita di una parte fusa dell'interno del pianeta, ha causato importanti fratture della superficie fino a distanze superiori a quella tra Tharsis ed Elysium. I luoghi in cui questo o altri avvenimenti simili hanno dato luogo allo sviluppo di numerose fratture, sono chiamate fosse sulla carta geologica del pianeta. In seguito allo sviluppo dell'altopiano elevato, si sono formate le pianure laviche e in prossimità dell'altopiano e durante la sua stessa formazione, sono cresciuti i vulcani a scudo. In un'epoca anteriore della storia marziana, epoca verificatasi dopo la prima formazione delle pianure vulcaniche, un processo simile ha creato il sollevamento Elysium: anche questo, più tardi, è stato accompagnato da un gruppo di eventi vulcanici.

Questo è il fondo della Mangala Vallis, che può essere il risultato della deposizione di silt durante gli ultimi stadi della formazione di un canale. Una struttura simile si trova sul fondo dei corsi d'acqua che si formano durante improvvise inondazioni.

La tettonica marziana differisce da quella terrestre da diversi e importanti punti di vista. La crosta terrestre si divide in una serie di zolle che stanno lentamente muovendosi l'una rispetto all'altra e costantemente sottopongono a modificazioni la geografia terrestre. Su Marte non vi è segno di movimenti crostali orizzontali di alcun tipo. La mancanza di un movimento di zolle su Marte può spiegare perché i vulcani a scudo del pianeta sono così grandi. Sulla Terra la zolla su cui si va sviluppando uno scudo vulcanico è in movimento rispetto alle porzioni più profonde dell'interno del pianeta da cui deriva il materiale che deve alimentarlo. Ne consegue lo sviluppo di una lunga teoria di scudi vulcanici come quella delle catene Hawaii-Emperor nel Pacifico che si estende dalle Aleutine fino alle Hawaii.

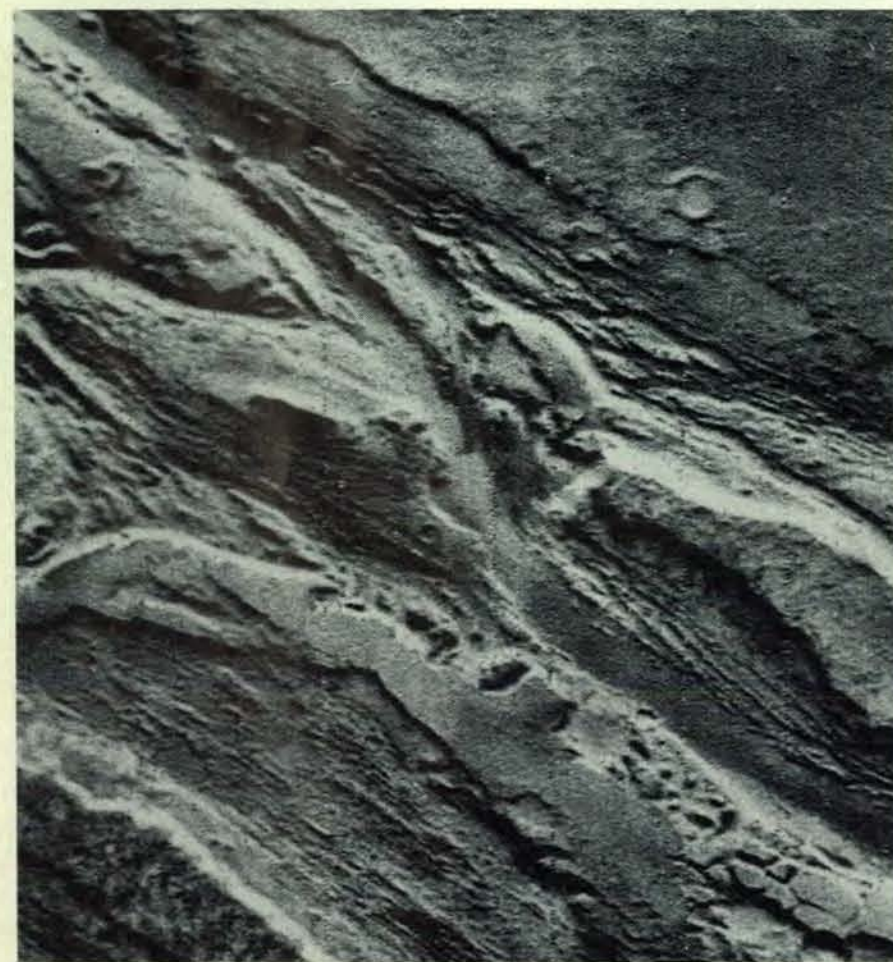
Uno dei risultati più notevoli della missione *Mariner 9* è stata la scoperta di canali sinuosi che sembrano essersi formati per l'attività di qualche forma di acqua corrente. I più ampi hanno lunghezze superiori ai 1500 chilometri e larghezza di oltre 200. Queste strutture spettacolari sono cose totalmente diverse dai famosi canali. Diversamente da questi, che si supponeva si irradiassero su tutto il pianeta, queste grandi vallate si ritrovano di preferenza nelle regioni equatoriali dove le temperature annue sono più elevate.

Vi sono numerose indicazioni che queste vallate siano state formate da erosione fluviale: la presenza di sistemi tributari immaturi, di isole di forma inequivocabile, di barre fluviali e di una struttura in generale a spiga. Quest'ultima può essere il risultato della deposizione di detriti trasportati dal liquido durante gli ultimi stadi di formazione della valle. Una determinata valle, di norma, mostra alcune di queste caratteristiche ma non tutte insieme. Quasi senza eccezione, la direzione della valle e la sua pendenza coincidono con la direzione e le pendenza che ci si sarebbe attesi se questa avesse avuto un'origine fluviale, origine che è suggerita sia dalle strutture morfologiche del fondovalle sia dalla geometria dei suoi affluenti.

I canali marziani sono abbastanza diversi dai canali di lava che si trovano sulla Luna e sulla Terra. Dunque, queste valli marziane quasi certamente non sono dovute al flusso di una colata lavica: è necessario cercare un fluido meno viscoso. Il candidato più probabile è costituito dall'acqua liquida. Nelle presenti condizioni, tuttavia, la quantità di vapore acqueo nell'atmosfera di Marte è così piccola che l'acqua superficiale evaporerebbe rapidamente. Evidentemente i canali sono stati scavati in un tempo anteriore, quando il clima di Marte era più caldo e umido.

In alcuni luoghi vi è un'ovvia sorgente d'acqua per queste grandi valli. Per esempio, le valli nella fascia tra 10 e 50 gradi ovest presso l'equatore, nascono da un tipo di territorio che in base alla sua morfologia è chiamato terreno caotico. Si tratta di una regione depressa caratterizzata da una rete disordinata di frammenti spezzati di rocce. Si pensa che questo terreno si sia formato per l'asportazione di materiale e la successiva scomparsa del ghiaccio sotterraneo. La fusione del ghiaccio sotterraneo potrebbe avere fornito l'acqua che ha tagliato queste valli. Per molte altre, tuttavia, non vi sono sorgenti così ovvie. Nel caso di valli con affluenti, l'acqua evidentemente ha avuto origine in zone molto più ampie.

Le grandi valli marziane sono assai simili alle strutture che sulla Terra si sono formate per l'improvvisa inondazione di una zona; il sistema di affluenti di alcune di queste valli sembrerebbe avallare l'ipotesi di una formazione in breve periodo di tempo. In certi casi sembrano esservi indizi che le varie valli si siano formate ciascuna in relazione a un determinato evento piuttosto che in relazione a uno più generale che avrebbe determinato l'escavazione di tutte la valli.

Il terreno tormentato e a colline è una regione caratterizzata da una serie di rilievi isolati a cima piatta che sono delimitati da scarpate con una geometria piuttosto intricata. Queste formazioni possono derivare dallo scioglimento del ghiaccio presente nel sottosuolo e dallo sviluppo di frane che determinano l'arretramento dei versanti.

Un'altra struttura morfologica è costituita dal cosiddetto terreno tormentato il cui sviluppo può essere stato influenzato dalla scomparsa di ghiaccio subsuperficiale. Il termine «tormentato» è usato per descrivere un territorio basso e piano bordato da scarpate ripide con una geometria intricata. All'interno del bassopiano immediatamente adiacente alle scarpate vi sono numerose piccole pianure sopraelevate rispetto al terreno circostante. Poche valli passano attraverso l'altopiano presso il suo confine con il bassopiano. Si pensa che il bassopiano sia stato generato a spese dell'altopiano attraverso l'esposizione di ghiaccio subsuperficiale, in corrispondenza delle

facce esposte delle scarpate. Mentre il ghiaccio sotterraneo va sciogliendosi, la parte sommitale della scarpata rimane priva di sostegno e frana quindi sul fondo. La ritirata della faccia della scarpata e il suo continuo logoramento, portano alla creazione delle regioni del bassopiano. Le piattaforme isolate nel bassopiano costituiscono luoghi in cui la disgregazione dell'altopiano è stata incompleta.

Una delle strutture più spettacolari di Marte è una regione poco a sud dell'equatore che, tra 45 gradi e 90 gradi ovest, ospita un gigantesco canyon. L'intero sistema vallivo, chiamato Valles Marineris, ossia «valli del Mariner», è lungo circa 2700 chilometri e ha una larghezza che talora raggiunge i 500 chilometri. Singoli canyon hanno lunghezze superiori al centinaio di chilometri, larghezze di oltre 200 e profondità di oltre 6.

Il sistema di canyon sembra essere il complesso risultato di una fratturazione, del ritiro del magma sottostante, della fusione del ghiaccio e dell'erosione fluviale. L'evento tettonico che ha determinato il sollevamento nella zona attorno a Labyrinthus Noctis ha dato luogo a un sistema di fratture parallelo all'asse lungo del sistema di canyon. Il ritiro del magma sotterraneo, forse per alimentare gli scudi vulcanici nella regione Tharsis, ha in un primo tempo creato una serie di piccoli crateri lungo le fratture che poi si sono allargate e congiunte per il proseguire dello stesso fenomeno e per l'arretramento dei due versanti causato dallo scioglimento del ghiaccio sottostante e dalle conseguenti frane e valanghe. Sui bordi del canyon lungo la superficie dell'altipiano, si trovano comunemente lunghi allineamenti di piccoli crateri che possono rappresentare canyon nei primi stadi della loro formazione (*si veda la figura a pagina 92*). Le frane hanno lasciato strette incisioni verticali in prossimità della parte alta delle pareti del canyon e invece banchi di materiale accatastato alla base delle scarpate. Il ritiro, lo scioglimento sotterraneo e il processo di franamento, hanno determinato l'instaurarsi di piccoli canyon che hanno continuato a svilupparsi in seguito agli stessi processi. Le piattaforme che corrono al centro di alcuni canyon più grandi possono rappresentare luoghi in cui due piccoli canyon un tempo confluivano.

Una parte importante nella modificazione dell'aspetto della superficie marziana è sostenuta anche dalle particelle di polvere trasportate dal vento. La ricorrenza di tempeste di sabbia, sia locali sia globali, offre una prova diretta che la polvere trasportata dal vento è una forza erosiva importante su Marte. Quando il vento marziano ha velocità che superano i 150 chilometri orari, piccole particelle di polvere sono poste in movimento. Altre particelle, di dimensioni superiori a 0,025 millimetri, sono trasportate per saltazione, e cioè si spostano per brevi distanze nell'atmosfera per ricadere poi a terra e rimbalzare di nuovo nell'atmosfera. Particelle più piccole, invece, tendono a deporsi così lentamente da rimanere per lungo tempo in sospensione e da spostarsi per grandi distanze prima di ricadere al suolo.

Visto attraverso un telescopio, Marte è costituito da zone chiare e scure delle dimensioni di un continente: esse mostrano mutamenti di contrasto nella posizione dei loro confini che si verificano stagionalmente. Queste variazioni stagionali avevano suggerito ai primi osservatori che esse potessero dipendere dalla crescita e dalla scomparsa di organismi marziani. Dieci anni fa, Carl Sagan della Cornell University e io abbiamo suggerito che questi cambiamenti superficiali potessero essere dovuti alla presenza di accumuli di polvere portata dal vento. La nostra ipotesi è stata ampiamente confermata dalle fotografie di *Mariner 9* che mostrano l'alternarsi di strutture chiare e scure spesso allineate in una direzione comune (*si veda la figura a pagina 86*). Questo allineamento è dovuto allo spirare del vento in una determinata direzione. Per di più, nelle fotografie di *Mariner 9* sono state osservate diverse strutture scure che non erano presenti nel gruppo di fotografie fatto inizialmente e che sono invece comparse qualche settimana dopo.

Le tempeste di sabbia a scala globale giocano una parte importante in questo cambiamento stagionale nella posizione dei limiti tra zone chiare e zone scure. Come la tempesta di sabbia cessa, ovunque si depone uno strato uniforme di particelle piccole e brillanti. Successivamente i venti che sono forti in particolari regioni a causa della loro geografia, o della loro vicinanza alla calotta polare, riprendono nuovamente in sospensione su scala locale alcune particelle più piccole e quindi la zona da cui la polvere è stata asportata torna a essere scura. Questa operazione continua qua e là fino alla successiva tempesta di polvere a carattere globale.

In prossimità di molti crateri sono ben visibili queste macchie chiare e scure più o meno allungate. Ronald Greeley dell'Università di Santa Clara, James D. Iversen della Iowa State University e io abbiamo compiuto una serie di esperimenti nella galleria del vento: queste strutture nascono quando un vento carico di polvere fluisce in prossimità dei bordi di un cratere. Mentre il vento scivola oltre i versanti del cratere, nasce un vortice che di preferenza rimuove le particelle dai versanti e anche sottovento al cratere lungo due zone simmetriche rispetto all'asse del cratere. Proprio a valle della parte centrale dell'orlo sottovento del cratere e sulla parte interna sopravento del cratere, tuttavia, l'aria è assai calma e le particelle vi si accumulano facilmente.

Le strisce che attraversano questa fotografia dall'alto a destra verso sinistra in basso, sono i margini del terreno stratificato caratteristico della regione polare di Marte. I depositi stratificati sono esposti su una superficie inclinata. L'erosione da parte dei venti marziani ne ha arrotondato la superficie. La struttura stratificata indica che si è determinata una variazione periodica nei processi che hanno condotto alla sua formazione.

Per periodi molto più lunghi, l'azione delle particelle portate dal vento ha effetti erosivi e deposizionali che sono molto più profondi che non quello sulla pura e semplice superficie. Dato che i venti marziani raggiungono velocità più elevate di quelli terrestri, la politura effettuata dal vento è assai più efficace e profonda su Marte che non sulla Terra. Le prove dell'esistenza di erosione dovuta a sabbia spostata per saltazione sono fornite da incisioni parallele ritrovate sulla superficie di molte zone marziane, oltreché dall'esistenza di colline modellate parallelamente e da cavità e rilievi osservati nelle regioni polari.

I venti possono aver messo in sospensione alcuni dei materiali prelevati al terreno caotico o alla zona dei canyon e averli trasportati fino alle regioni polari dove hanno formato un imponente deposito sedimentario. Questi depositi polari sono costituiti da una miscela di piccole particelle di polvere e di ghiacci. Vi sono due tipi fondamentali di depositi sedimentari in entrambe le zone polari che coprono terreni più antichi. Il deposito più antico è di tipo non stratificato e copre una pianura sforacchiata da crateri. Quello più recente si trova più prossimo a entrambi i poli e all'unità geologica sulla quale posano le calotte polari permanenti. Proprio per questa sua struttura esso è stato denominato terreno laminato. Nelle fotografie riprese con la telecamera grandangolare e a bassa risoluzione del *Mariner 9*, il terreno laminato sembra costituito da una serie di lamine via via più piccole dal basso verso l'alto. Nelle immagini ad alta risoluzione si vedono le pareti di ciascuna lamina: si tratta di strati individuali ciascuno dello spessore di 30 metri. La struttura stratificata suggerisce che deve esserci stata qualche variazione periodica nei processi che hanno determinato la deposizione della parte più recente di questo deposito. Attualmente entrambi i depositi polari vengono erosi. Il materiale che è stato rimosso è stato ridepositato di preferenza nelle regioni alle medie latitudini attorno ai depositi polari dove forma un sottile strato superficiale e parzialmente riempie l'interno dei crateri.

Tutto sembra indicare che il clima di Marte era un tempo molto diverso da quello odierno. Un meccanismo per giustificare il cambiamento climatico su Marte è basato sulla sensibilità dell'anidride carbonica atmosferica al mutare delle temperature polari. Quando queste sono basse, la quantità di anidride carbonica presente nell'atmosfera diminuisce; quando sono alte, il contenuto di anidride carbonica può aumentare notevolmente se vi è nel regolite un deposito sufficientemente grande di anidride carbonica da fornire la quantità di questo gas che manca per raggiungere l'equilibrio. Peter J. Gierasch, Owen B. Toon e Sagan hanno dimostrato che un aumento iniziale nelle temperature polari aumenta la massa totale dell'atmosfera che allora trasporta più calore verso il polo riscaldandolo quindi ulteriormente. In certi casi questo processo di *feedback* dà luogo a una situazione che porta a una pressione atmosferica molto più elevata, addirittura paragonabile a quella terrestre.

Quanto alle variazioni nella temperatura ai poli, si può pensare a diversi fattori che possono innescarle e portare quindi a mutamenti assai notevoli nel contenuto di anidride carbonica dell'atmosfera marziana. Primo, c'è la possibilità che la luminosità del Sole sia cambiata secondo cicli che possono essere durati milioni o centinaia di milioni di anni. Ciascuno di questi mutamenti nella luminosità del Sole avrebbe naturalmente determinato mutamenti contemporanei nei climi di tutti i pianeti, ivi compresa la Terra. Secondo, la riflettività delle regioni polari di Marte può mutare a causa di variazioni nella frequenza delle principali tempeste di sabbia che depositano materiali in queste regioni. Terzo, come ha dimostrato William R. Ward della Harvard University, l'asse di rotazione di Marte, diversamente da quello della Terra, muta la sua inclinazione verso o lontano dal Sole più di 20 gradi secondo cicli che durano da 100 000 a un milione di anni.

Qualunque sia la causa, un aumento nel contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera marziana tenderà a obbligare l'acqua a passare attraverso lo stato liquido invece che a sublimare direttamente dallo stato solido. D'altro canto, un aumento nell'anidride carbonica atmosferica può realmente abbassare la temperatura nelle regioni equatoriali, diminuendo il gradiente termico equatore-polo. Questo sembrerebbe opporsi alla comparsa di acqua liquida. Per di più, l'anidride carbonica di per se stessa può fare ben poco di più di quanto non faccia già oggi per riscaldare la superficie marziana per effetto serra. Qualunque processo che aumenti, tuttavia, il contenuto di anidride carbonica nell'atmosfera, porterebbe immediatamente all'aumento anche del suo contenuto in vapore acqueo, il quale per effetto serra riscalderebbe effettivamente la superficie

Questa curiosa superficie si trova nella regione polare meridionale di Marte ed è più antica del terreno stratificato. Per di più, diversamente dal terreno stratificato, l'accumulo deposizionale non mostra una stratificazione evidente nemmeno laddove l'erosione da parte del vento ha tagliato le scarpate attorno ai rilievi e alle cavità.

marziana. Così sembrano disponibili sulla superficie del pianeta meccanismi adatti a creare le condizioni climatiche necessarie perché acque superficiali possano essere state un tempo stabili nelle regioni equatoriali di Marte.

Un fattore finale che può essere importante per i mutamenti climatici su Marte è l'alterazione dell'atmosfera dal suo attuale stato ossidato verso uno più ridotto. Ho già suggerito che, quando l'atmosfera di Marte stava sviluppandosi dall'interno del pianeta, una certa quantità di atomi di carbonio erano presenti sotto forma di metano piuttosto che non di anidride carbonica. Non è escluso che fosse presente anche dell'ammoniaca. Dato che metano e ammoniaca hanno temperature di condensazione più basse dell'anidride carbonica, un'atmosfera riducente di questo tipo potrebbe facilmente raggiungere pressioni elevate.

L'ammoniaca, agendo insieme con il vapore acqueo, riscalderebbe molto efficacemente la superficie del pianeta per effetto serra. Si sarebbe tentati di concludere che una iniziale atmosfera riducente fosse il prodotto finale della formazione delle più antiche pianure vulcaniche e che a essa sia stata dovuta in larga misura l'era di più profonda degradazione dei crateri. A quel tempo le condizioni potevano essere favorevoli per la formazione di canali fluviali e di calanchi. Mentre la degassazione del pianeta diminuiva, il contenuto atmosferico di idrogeno molecolare calava notevolmente e l'atmosfera marziana evolveva fino allo stato attuale.

La presenza di un'atmosfera riducente è ritenuta necessaria per la Terra per giustificare la formazione delle prime forme di vita sul nostro pianeta. Potrebbe la vita essersi generata anche su Marte quando questo pianeta aveva la sua ipotetica atmosfera riducente? E se così è stato, potrebbe la vita essersi adattata alle condizioni ambientali attuali? Anche se non vi è acqua liquida su Marte oggi, potrebbe un ipotetico organismo marziano fare uso dell'acqua che è legata ai granuli di sabbia superficiali? Non abbiamo risposte per ora a queste domande. Nella prossima estate scenderanno sulla superficie di Marte i due veicoli Viking per condurre diversi esperimenti diretti proprio ad accertare o meno l'esistenza di vita sul pianeta. Dato che non conosciamo le precise caratteristiche della vita marziana, ammesso che esista, le nostre speranze di ottenere una risposta definitiva dai due Viking non dovrebbero essere eccessive. Ma come minimo, tuttavia, otterremo dati fondamentali sull'ambiente fisico di Marte. E imparando di più circa i fattori che hanno influenzato i mutamenti climatici sul pianeta rosso, dovremmo essere in grado di capire meglio i fattori che causano i mutamenti climatici attuali, passati e del futuro sulla Terra.

Giove

Più massiccio di tutti gli altri pianeti messi assieme, è costituito in gran parte da idrogeno e da elio. Sotto la sua atmosfera turbolenta l'idrogeno forma due strati liquidi, uno molecolare e uno metallico

di John H. Wolfe

La caratteristica più appariscente di Giove consiste nelle sue dimensioni: non solo è il pianeta più grande, ma ha circa due volte e mezzo la massa di tutti gli altri pianeti messi insieme. Dal sistema solare in via di evoluzione prese la maggior parte della materia che non contribuì a formare il Sole. In realtà, non si commette un grande errore considerando il sistema solare come un insieme di due corpi, trascurando tutto salvo il Sole e Giove.

Le caratteristiche di un oggetto che riveste tanta importanza nel sistema solare sono ovviamente interessanti. È noto che la composizione fondamentale di Giove è simile a quella solare, ma la struttura del pianeta non assomiglia né a quella di una stella né a quella di un pianeta terrestre come la Terra. Giove è essenzialmente un corpo liquido con, al massimo, un piccolo nucleo solido. Sopra la superficie liquida vi è una densa atmosfera le cui tempeste e moti di insieme si presentano in teoria simili a quelli terrestri, ma su scala tanto più grande da far apparire sproporzionato un confronto. Giove ha un campo magnetico complesso e un sistema pure complesso di fasce di radiazione ed è una potente sorgente di onde radio.

Infine, Giove ha tredici satelliti, più di qualunque altro pianeta. La scoperta dei quattro satelliti maggiori costituì un evento notevole nella storia dell'astronomia. Nel 1610, Galileo Galilei si esercitava col suo cannocchiale, appena costruito, a osservare Giove e rimase stupito nel vedere queste brillanti «lune» a cui furono in seguito dati i nomi di Io, Europa, Ganimede e Callisto. L'osservazione di Galileo fornì la prima prova che altri pianeti, oltre la Terra, avevano satelliti e tolse ogni credito alle teorie non copernicane di meccanica celeste.

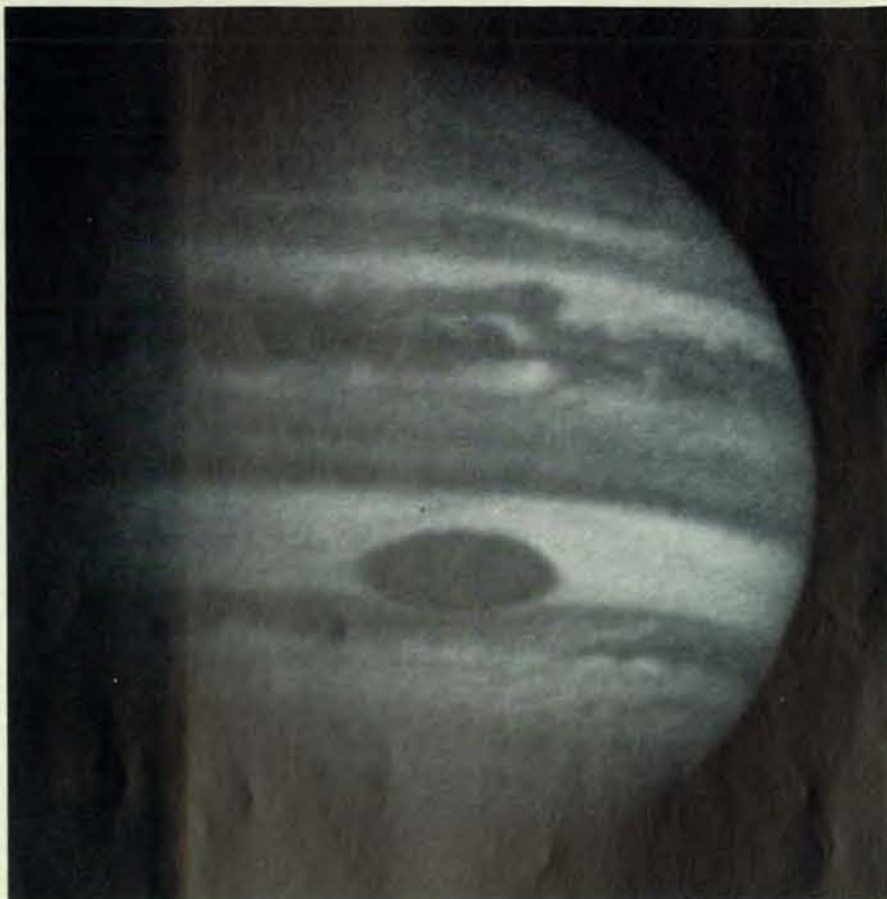
Dai tempi di Galileo gli astronomi hanno intensamente studiato Giove nelle regioni spettrali del visibile, dell'infrarosso e delle onde radio e, più recentemente, due sonde spaziali americane della serie Pioneer sono transitate vicino al pianeta, inviando a terra fotografie e altri tipi di informazioni. *Pioneer 10* fu lanciato nel marzo 1972 e raggiunse il punto di minima distanza da Giove tra la fine di novembre e l'inizio di dicembre 1973; *Pioneer 11* fu lanciato nell'aprile 1973 e si avvicinò al massimo al pianeta circa un anno dopo *Pioneer 10*.

Una prima ragione per avanzare l'ipotesi che la composizione di Giove debba essere simile a quella solare è di origine cosmologica: se il Sole e i pianeti si sono formati tutti quanti da un'unica nube di gas e di polvere, ciò significa che probabilmente hanno ricevuto tutti, all'inizio, una parte uguale di tutti i materiali presenti nella nube. La composizione dei pianeti più piccoli è stata drasticamente alterata dalla perdita degli elementi più leggeri, ma Giove è così massiccio che può averli conservati praticamente tutti, anche il più leggero: l'idrogeno. Il tempo necessario, perché una quantità importante di idrogeno potesse sfuggire all'attrazione gravitazionale di Giove, è superiore di molti ordini di grandezza all'età del sistema solare. Giove, come il Sole, dovrebbe avere oggi all'incirca la stessa composizione chimica che aveva all'epoca della sua formazione, circa 4,6 miliardi di anni fa.

Le misure della densità di Giove confermano queste ipotesi. Sebbene Giove abbia un volume più di 1000 volte superiore a quello della Terra, ha una massa solo 318 volte superiore, di modo che la sua densità (1,33 grammi per centimetro cubo) è inferiore a un quarto di quella terrestre. Giove deve perciò essere formato da grandi quantità di elementi leggeri e i soli elementi possibili sono idrogeno e elio. Il rapporto idrogeno-elio è di fondamentale importanza in qualsiasi modello della sua struttura e tale rapporto è stato misurato con diverse tecniche dagli strumenti di *Pioneer 10* e *Pioneer 11*. Sebbene le misure non siano in perfetto accordo, esse concordano tuttavia con l'ipotesi che il rapporto sia uguale in Giove e nel Sole. Il rapporto solare è di circa un atomo di elio per 10 molecole di idrogeno.

I modelli dell'interno di Giove devono tener conto dei vari dati sperimentali oltre che della composizione chimica. Si è trovato, per esempio, che Giove irradia più del doppio del calore che riceve dal Sole e deve perciò avere una fonte interna di calore. Anche il campo magnetico di Giove, di un ordine di grandezza superiore a quello terrestre, deve trovare una spiegazione; le attuali teorie su come si formano i campi magnetici planetari richiedono che l'interno del pianeta contenga un fluido elettricamente conduttivo. Infine, un modello della struttura del pianeta deve essere in accordo con la forma e l'intensità osservata del campo gravitazionale del pianeta.

Se Giove non fosse in rotazione, assumerebbe una forma perfettamente sferica (trascurando le perturbazioni dovute ai satelliti e al Sole) e si comporterebbe come una massa puntiforme. Il suo cam-

Il polo nord di Giove (*nella pagina a fronte*), che non si può vedere dalla Terra, è stato fotografato per la prima volta dalla sonda spaziale *Pioneer 11*. Il polo è vicino alla linea del terminatore, il confine tra il giorno e la notte nella parte superiore della fotografia. Le aree di colore blu-grigiastro intenso in alto e ai lati possono essere il « cielo blu » dovuto a diffusione Rayleigh della luce solare da parte dell'atmosfera. La regione polare boreale è decisamente priva di bande e il suo aspetto screziato fa pensare che vi siano celle convettive ascensionali. La fotografia è stata fatta da una distanza di 1,3 milioni di chilometri e alla latitudine di 50 gradi sopra l'equatore.

Le bande di Giove sono costituite di « zone » chiare che vanno dal colore bianco a giallo chiaro e di « fasce » scure di varie tonalità di bruno rossiccio. Le zone e le fasce vicino all'equatore sono bande permanenti che variano lentamente in larghezza e colore e a volte si suddividono in sottobande. La caratteristica più saliente di Giove è la « grande macchia rossa » scoperta oltre 300 anni fa da G. D. Cassini. Questa fotografia è stata eseguita dalla sonda *Pioneer 10* da una distanza di tre milioni di chilometri.

La « piccola macchia rossa » nella zona tropicale boreale di Giove fu fotografata nel 1973 da *Pioneer 10*. La sua struttura è simile a quella della grande macchia rossa della zona tropicale australe. La somiglianza toglie qualcosa all'unicità della grande macchia rossa e suggerisce che entrambi i fenomeni siano strutture cicloniche di lunga durata simili a uragani. La piccola macchia rossa fu osservata da Terra per 18 mesi prima di essere fotografata da *Pioneer 10*, ma scomparve prima che *Pioneer 11* raggiungesse Giove.

po gravitazionale avrebbe una simmetria sferica: a una data distanza dal pianeta l'intensità del campo sarebbe la stessa sia che si misurasse sopra l'equatore sia che si misurasse sopra il polo. Ma Giove ruota rapidamente; la rotazione provoca una distorsione del pianeta e altera perciò i contorni del campo gravitazionale.

Si può determinare il periodo di rotazione di Giove misurando semplicemente l'intervallo tra transiti successivi sul piano meridiano di una caratteristica a lunga vita della sua atmosfera. Queste misure danno però risultati diversi a diverse latitudini. Strutture caratteristiche entro 10 gradi dall'equatore ruotano con un periodo medio di nove ore, 50 minuti e 30 secondi. Per caratteristiche a latitudine maggiore il periodo di rotazione è leggermente più lungo; il valore adottato è di nove ore, 55 minuti e 41 secondi. La differenza è probabilmente dovuta a variazioni sistematiche dei grandi venti gioviani.

Una misura più attendibile, e forse più significativa, del periodo di rotazione si può ottenere da osservazioni delle emissioni radio del pianeta. Alcune di queste emissioni sono polarizzate e orientate direzionalmente dal campo magnetico di Giove. Poiché l'asse del dipolo magnetico è inclinato di circa 11 gradi rispetto all'asse di rotazione, i segnali ricevuti sulla Terra variano in intensità e direzione di polarizzazione in sincronia con la rotazione di Giove. Il periodo che si ricava dalle misure radio è di nove ore, 55 minuti e 30 secondi, in buon accordo col periodo misurato otticamente ad alte latitudini. Quello che si misura in realtà con questo metodo è la rotazione del campo magnetico. Dal momento che le correnti che generano il campo si trovano a notevole profondità entro il pianeta, le osservazioni delle emissioni radio rappresentano probabilmente, con precisione superiore a quella di altri metodi, la rotazione di Giove nel suo insieme.

La bassa densità e la rapida rotazione di Giove danno origine a un notevole rigonfiamento equatoriale. Le migliori determinazioni della forma del pianeta, misurata alla sommità delle nubi, danno un raggio equatoriale di 71 400 chilometri e un raggio polare di 67 000 chilometri. Così Giove è appiattito a ciascun polo di 4400 chilometri, circa due terzi del raggio terrestre. (Per misure astronomiche in prossimità di Giove si adotta un raggio standard di 71 372 chilometri.)

L'entità e la natura delle deviazioni di Giove dalla forma sferica si determinano dalla distribuzione di densità nell'interno del pianeta. Questa distribuzione deve anche riflettersi nel campo gravitazionale esterno del pianeta e lo studio di tale campo si è rivelato un mezzo potente ed efficace per dedurre la struttura del pianeta.

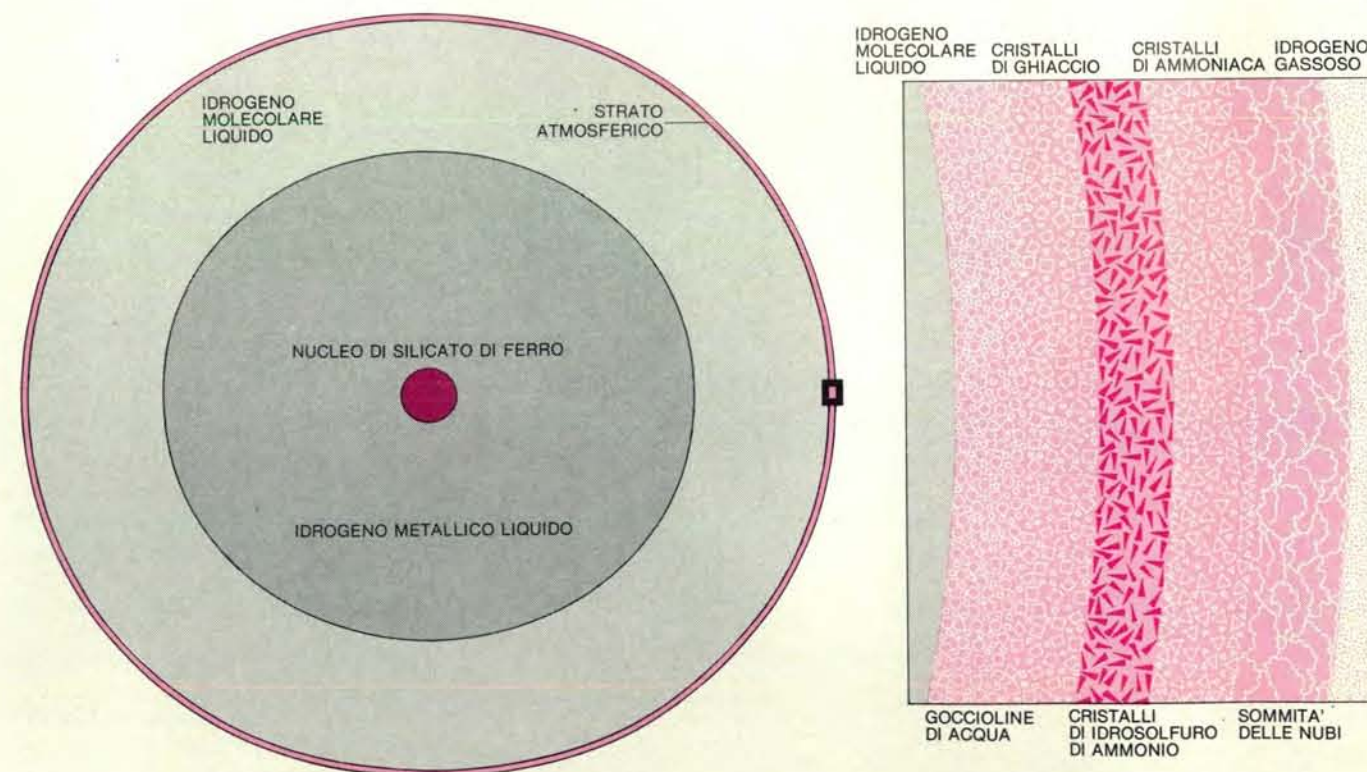
La forma particolareggiata del campo gravitazionale gioviano è stata esaminata seguendo la traiettoria dei veicoli spaziali Pioneer, mentre passavano vicino al pianeta. Le traiettorie furono calcolate sull'ipotesi che Giove avesse una massa puntiforme e le deviazioni dalle traiettorie previste poterono essere rilevate con grande precisione. L'analisi gravitazionale, resa possibile dagli esperimenti di inseguimento dei Pioneer, stabilì che il corpo solido sotto l'atmosfera di Giove è in realtà un liquido.

Dalle osservazioni dei Pioneer, John D. Anderson, del Jet Propulsion Laboratory del California Institute of Technology e William B. Hubbard dell'Università dell'Arizona proposero un modello per l'interno di Giove (*si veda la figura in basso*). Il modello è in accordo con ciò che si sa sui campi gravitazionale e magnetico di Giove e con i risultati della estrapolazione dei dati di laboratorio sul comportamento dell'idrogeno ad alte temperature e della pressione per valori ancora più alti.

Il modello prevede un piccolo nucleo roccioso al centro del pianeta dove si pensa che la temperatura sia di circa 30 000 kelvin. Il nucleo sarebbe composto di ferro e silicati, ossia i principali costituenti della Terra. Un nucleo di questo tipo è previsto per ragioni cosmogoniche: se la composizione di Giove è simile a quella solare, allora il pianeta deve contenere una piccola parte di questi elementi e poiché questi sono relativamente densi si aggregherebbero nel centro. Il nucleo non può essere rivelato mediante studi gravitazionali, per cui la sua esistenza non può essere dimostrata.

Sopra questo ipotetico nucleo vi è uno spesso strato in cui predomina l'abbondanza di idrogeno; questo strato costituisce quasi tutta la massa e il volume del pianeta. L'idrogeno è separato in due strati: in entrambi è liquido, ma in stati fisici diversi. Lo strato interno si estende dal nucleo a circa 46 000 chilometri dal centro, dove si valuta che vi sia una pressione di circa tre milioni di atmosfere terrestri e una temperatura di circa 11 000 kelvin. In questo strato l'idrogeno è in uno stato metallico liquido, una forma dell'elemento che non è ancora stata osservata in laboratorio, perché esiste solo a pressioni estremamente alte. Nello stato metallico liquido le molecole di idrogeno sono dissociate in atomi e il fluido è un ottimo conduttore elettrico.

Lo strato esterno si estende fino a circa 70 000 chilometri ed è composto principalmente da idrogeno liquido nella sua forma molecolare. Sopra lo strato di idrogeno molecolare vi è l'atmosfera che si estende per altri 1000 chilometri fino alla sommità delle nubi.

Supponendo che questo modello di struttura interna del pianeta sia esatto, l'eccesso di calore irraggiato da Giove è semplicemente una rimanenza del calore generatosi quando avvenne la formazione del pianeta dalla nebulosa solare. Secondo i modelli precedenti, la spiegazione andava ricercata nella radioattività o nel calore liberato dalla contrazione sotto le forze gravitazionali di un pianeta in gran parte gassoso. Considerato tuttavia che un liquido è praticamente incomprimibile, Giove non può irradiare calore perché sta contraendosi, ma, al contrario, si sta contraendo perché si sta raffreddando lentamente. Questa spiegazione della radiazione in eccesso richiede che l'energia termica primordiale del pianeta, che è per lo più limitata all'interno, sia continuamente convogliata verso la superficie. Così il modello di un pianeta liquido prevede che la maggior parte

Il modello della struttura interna di Giove, raffigurato qui in sezione, si basa sull'ipotesi che l'idrogeno liquido formi la maggior parte dell'interno del pianeta salvo un possibile piccolo nucleo di silicato di ferro. L'esistenza di questo nucleo si basa sul fatto che l'abbondanza degli elementi in Giove dovrebbe essere simile a quella solare. Il modello prevede una temperatura di 30 000 kelvin nella regione del nucleo. Uno spesso involucro di idrogeno metallico liquido circonda il nucleo. L'idrogeno metallico è un conduttore elettrico e le correnti elettriche nell'involucro sono probabilmente la sorgente del campo magnetico di Giove. A circa 46 000 chilometri dal centro del pianeta vi è una transizione da idrogeno metallico liquido a idrogeno liquido nella sua forma molecolare. Si valuta che la pressione nella regione di transizione sia di circa tre milioni di atmosfere e la temperatura di circa 11 000 kelvin. L'involucro di idrogeno molecolare liquido ha uno spessore di circa 24 000 chilometri. Sopra l'idrogeno liquido si estende l'atmosfera gassosa di Giove che ha uno spessore di circa 1000 chilometri. Un particolare ingrandito della transizione da idrogeno liquido a idrogeno gassoso è rappresentato nella parte destra della figura.

della massa di Giove sia agitata da correnti convettive su larga scala, anche se è possibile che alla convezione si opponga un gradiente di concentrazione di elio.

Le correnti convettive rappresentano anche un probabile meccanismo capace di generare il campo magnetico di Giove. Le correnti convettive entro lo strato di idrogeno metallico liquido, deviate dalla forza di Coriolis, potrebbero generare circuiti chiusi di corrente elettrica che darebbero origine a un campo magnetico. Si pensa che sia un processo simile nel nucleo della Terra a generare il suo campo magnetico, ma la teoria di queste «dinamo» planetarie non è ancora sicura.

Né la superficie, né l'interno di Giove sono oggi accessibili: quando osserviamo il pianeta, vediamo solo l'estremità superiore dell'atmosfera. Il disco visibile del pianeta è ricoperto dalla ben nota sequenza di bande alternativamente chiare e scure, tutte orientate parallelamente all'equatore. Per convenzione le bande chiare si chiamano «zone» e quelle scure «fasce». Le zone sono generalmente da bianche a gialle chiare e le fasce sono di varie tonalità di bruno rossiccio. Le cinque zone e le quattro fasce della parte centrale del disco sono caratteristiche permanenti, sebbene varino lentamente in larghezza, colore e intensità. A latitudini maggiori le bande sono meno stabili nel tempo e a latitudini superiori a 50 gradi le bande stesse spariscono completamente per essere sostituite, nelle regioni polari, da una struttura meno ordinata.

La superficie è contrassegnata non solo da bande, ma anche da una varietà di pennacchi, strie, vortici, protuberanze, macchie e chiazze irregolari, tutte di colore variabile dal bianco al bruno rossiccio al rosso. La più importante di queste irregolarità è la «grande macchia rossa» una immensa configurazione ovale che è situata in gran parte entro la zona tropicale meridionale, ma che sporge un po' nella fascia equatoriale australe (*si veda la figura sulla copertina di questo fascicolo*). La macchia esiste da almeno 300 anni, da quando cioè è stata scoperta da Giovanni Domenico Cassini nel 1665. Ha una larghezza praticamente costante di 14 000 chilometri, ma la sua lunghezza varia da 30 000 a 40 000 chilometri nell'arco di pochi anni. Anche l'intensità della colorazione è variabile; durante i passaggi ravvicinati dei Pioneer del 1973 e del 1974 l'intensità era notevole, mentre sei o sette anni prima era assai debole.

Le missioni Pioneer hanno rivelato che anche nell'atmosfera, come nell'interno, la convezione è di estrema importanza. Passando intorno al pianeta il veicolo spaziale ha misurato le temperature atmosferiche della parte in ombra di Giove, misure che non si possono eseguire dalla Terra. (Dato che l'orbita di Giove è molto al di là di quella terrestre, noi osserviamo il pianeta come se fossimo sul Sole e vediamo poco più della parte illuminata del disco.) È risultato che la parte illuminata e la parte in ombra hanno la stessa temperatura, e ciò fa pensare che la capacità termica dell'atmosfera di Giove sia enorme e conferma l'importanza di una sorgente interna di calore. Si è potuto anche stabilire che le zone luminose sono più fredde, e perciò si trovano a quote più alte nell'atmosfera delle bande scure. Le misure di temperatura hanno dimostrato, senza lasciare dubbi, che le zone sono regioni di gas in moto ascendente e le fasce regioni di gas in moto discendente (*si veda la figura in questa pagina*).

Anche nelle regioni polari (che pure non si possono vedere distintamente dalla Terra e che furono fotografate la prima volta da *Pioneer 11*) le nubi sono screziate e ciò suggerisce che sono divise in numerose celle convettive (*si veda la figura a pagina 100*). A latitudini inferiori, le intense forze di Coriolis generate dalla rapida rotazione di Giove convertono le correnti convettive verticali in bande orizzontali che circondano il pianeta. Quando il gas si alza entro una zona, tende a muoversi verso l'equatore o verso il polo per poi scendere nella fascia adiacente. Questo moto nord-sud subisce una deflessione da parte della forza di Coriolis che produce una circolazione est-ovest. Si osserva lo stesso meccanismo nell'atmosfera terrestre nello sviluppo dei venti alisei, ma la forza di Coriolis su Giove è assai più forte. Si è osservato che le configurazioni atmosferiche nelle zone equatoriali si spostano con velocità di parecchie centinaia di chilometri all'ora.

In prossimità del centro delle zone, il moto del gas in direzioni opposte crea regioni di gradiente trasversale della velocità del vento. Le velocità più alte (rispetto all'interno del pianeta) si trovano in correnti a getto ai confini tra zone e fasce. Le forti velocità del vento generano turbolenza e sono quasi certamente responsabili dei gorghi, delle protuberanze, dei vortici visibili nell'atmosfera. Possono anche dare origine o mantenere le macchie che sono generalmente alquanto più grandi delle altre particolarità; resta dubbio, tuttavia, se siano in grado di spiegare la grande macchia rossa.

La circolazione atmosferica vicino alla zona equatoriale di Giove è raffigurata in questa illustrazione. Il gas riscaldato dal calore interno del pianeta sale e si raffredda nella parte superiore dell'atmosfera formando nubi costituite da cristalli di ammoniaca in sospensione in idrogeno gassoso. Le nubi formano le zone chiare di Giove che sono più alte e più fredde delle bande scure. Alla sommità delle nubi il gas raffreddato da una parte della zona chiara tende a scendere verso l'equatore, mentre il gas dall'altra parte della zona tende a scendere verso il polo. Le forze di Coriolis prodotte dalla rapida rotazione di Giove piegano il moto nord-sud verso est e verso ovest. Un meccanismo simile nell'atmosfera terrestre è responsabile dei venti alisei.

La magnetosfera di Giove si espande e si contrae con variazioni della pressione d'urto del vento solare. Il limite dove vi è equilibrio tra pressione del campo magnetico e pressione del vento solare si chiama magnetopausa. Nel loro viaggio verso Giove, *Pioneer 10* e *Pioneer 11* hanno rivelato che la magnetopausa può distare fino a un massimo di 100 raggi gioviani dal pianeta o a un minimo di 50 raggi. Il campo magnetico di Giove è dipolare e l'asse del campo dipolare è inclinato di 10,8 gradi rispetto all'asse di rotazione. Inoltre l'asse del campo dipolare è spostato di circa 7000 chilometri dal centro del pianeta. Le misurazioni effettuate da *Pioneer 11* hanno rivelato che l'intensità del campo magnetico di Giove alla sommità delle nubi varia da tre a 14 gauss. Il campo magnetico diventa più complesso in prossimità del pianeta, presentando momenti di quadrupolo e ottupolo che sono presumibilmente il risultato di configurazioni complesse di circolazione esistenti all'interno del pianeta.

Prima del passaggio vicino a Giove di *Pioneer 10*, si pensava che la grande macchia rossa fosse dovuta a un fenomeno di vortice chiamato «colonna di Taylor», che spiegava la macchia come un tipo di onda stazionaria, formata su una montagna o una depressione della superficie del pianeta. Un punto debole di questa ipotesi era che durante il secolo scorso la macchia si era spostata in longitudine per una distanza pari a diversi giri del pianeta. Inoltre poiché sappiamo ora che la maggior parte di Giove è allo stato liquido e che non ci possono essere montagne o depressioni, l'ipotesi della colonna di Taylor appare improbabile.

Oggi sembra invece più plausibile che la grande macchia rossa sia di tipo ciclonico, qualcosa di simile a un uragano. Sulla Terra gli uragani conservano la loro intensità finché rimangono nella zona tropicale degli oceani e si attenuano solamente quando si spostano sulla terraferma o su acque più fredde. Giove non ha terraferma e la posizione della grande macchia rossa si mantiene entro uno stretto intervallo di latitudini, la zona tropicale australe, che può essere considerata come la «fascia di uragano» di Giove. Se la macchia è una tempesta, resta l'enigma della sua longevità, ma è possibile che il tempo di vita delle caratteristiche di una nube sia semplicemente in funzione delle sue dimensioni.

L'interpretazione della grande macchia rossa come una enorme tempesta è convalidata dalla recente scoperta che non si tratta di un qualcosa di unico. Una macchia molto più piccola apparve nel 1972 nell'emisfero boreale e 18 mesi più tardi il *Pioneer 10* ha dimostrato che era simile per forma e colore alla grande macchia rossa (*si veda l'illustrazione in basso a pagina 102*). Un anno dopo, quando *Pioneer 11* passò vicino al pianeta, la piccola macchia era scomparsa, e ciò suggerì che il tempo di vita era stato di circa due anni.

La scoperta che le zone e le fasce di Giove sono costituite da gas a diverse altezze e temperature chiarisce la loro struttura fisica, ma non spiega la loro violenta colorazione. Si devono spiegare i colori in base alla chimica dell'atmosfera che non è ancora ben conosciuta. Nell'atmosfera di Giove sono state identificate spettroscopicamente cinque sostanze: idrogeno, elio, ammoniaca, metano e acqua e si suppone inoltre la presenza di acido solfidrico. Tutti questi gas sono privi di colore, per cui altri materiali devono essere presenti per creare le caratteristiche osservate. Tra le molecole proposte come materiali coloranti ci sono il solfuro di ammonio, l'idrosolfuro di ammonio, radicali liberi, vari composti organici e polimeri inorganici complessi. Molte di queste sostanze potrebbero essersi formate nella parte più alta dell'atmosfera, ma i componenti princi-

pali delle nubi non solo devono essersi formati, ma devono anche essersi formati con grande rapidità.

Sotto l'influsso di forti correnti convettive, le molecole delle nubi di Giove sarebbero rapidamente trasportate verso il basso in regioni di temperatura superiore dove si dissocerebbero. Se una sostanza è abbondante alla sommità delle nubi, essa deve venire continuamente rigenerata.

La sommità delle nubi nelle zone, ossia gli elementi più alti e più freddi dell'atmosfera visibile, è probabilmente costituita da cristalli di ammoniaca. Alle temperature di queste regioni, l'ammoniaca sarebbe gelata, il che spiegherebbe il biancore delle zone. Ad altitudini inferiori nelle fasce, la temperatura è sopra il punto di fusione dell'ammoniaca ed è a questo livello che si troverebbero i vari composti colorati. Nel successivo strato più basso potrebbe essere presente l'acqua, prima sotto forma di cristalli di ghiaccio, poi, ancora più in basso, sotto forma di goccioline.

Che Giove abbia un campo magnetico fu sospettato la prima volta negli anni cinquanta, quando furono scoperte le emissioni radio del pianeta. Tali emissioni provengono da due regioni relativamente larghe dello spettro, quella delle lunghezze d'onda misurate in decimi di metri (emissioni decimetriche) e quella delle lunghezze d'onda misurate in decine di metri (emissioni decametriche). Una delle componenti principali dell'emissione decimetrica è data dalla radiazione termica che ha uno spettro continuo e una polarizzazione casuale, è costante nel tempo ed è emessa da tutto il disco. Un contributo importante all'emissione decimetrica, tuttavia, è dato da un meccanismo non termico e dipende dal campo magnetico del pianeta. Tale meccanismo consiste di radiazione di sincrotrone emessa da elettroni che si muovono nel campo magnetico con velocità prossime a quella della luce. Gli elettroni relativistici seguono percorsi elicoidali lungo le linee di forza magnetiche, irradiando parte della loro energia quando si muovono tra i poli magnetici.

Un primo piano della superficie di Giove ripreso da 600 000 chilometri da *Pioneer 11* mostra dettagli mai visti prima. Si ritiene che le frangiature e i vortici tra le bande di scure e chiare siano il risultato di torsioni tra correnti a getto adiacenti che si muovono in direzioni opposte. Le strutture bianche indicano generalmente un moto verso l'alto dell'atmosfera e le aree scure un moto verso il basso. Si pensa che le macchie circolari bianche nella regione polare boreale in alto siano tempeste simili a uragani. Le tempeste polari di Giove, simili agli uragani tropicali sulla Terra, potrebbero essere rinforzate dal calore latente di condensazione. Una colonna di vapore acqueo e vapori di ammoniaca riscaldata dal calore interno di Giove comincerebbe a salire creando un'area di bassa pressione in cui altra atmosfera verrebbe inghiottita. Mentre la colonna si innalza, il vapore acqueo condenserebbe, liberando ulteriore calore che farebbe salire ancora di più la colonna; il calore restante sarebbe irraggiato nello spazio.

La radiazione decametrica è intermittente e la sua sorgente sconosciuta: potrebbe essere generata da scariche elettriche nell'atmosfera e nella ionosfera. La sua intensità è modulata dal più interno dei satelliti galileiani, Io. Sia l'emissione di sincrotrone decimetrica, sia la radiazione decametrica sporadica sono associate con la rotazione del campo magnetico di Giove.

Eccetto che in prossimità del pianeta, la componente principale del campo magnetico di Giove è dipolare, come quella della Terra. La direzione del campo però è opposta a quella della Terra, di modo che una bussola terrestre portata su Giove indicherebbe il sud. L'asse del campo dipolare è inclinato rispetto all'asse di rotazione di circa 10,8 gradi e il centro dell'asse è spostato rispetto al centro del pianeta di circa un decimo del raggio di Giove, soprattutto lungo l'equatore. A una distanza di tre raggi gioviani, l'intensità del campo è di circa 0,16 gauss. A distanze inferiori dal pianeta, il campo è più complesso, ma le misurazioni fatte da *Pioneer 11* indicano che alla sommità delle nubi esso varia da circa tre gauss a poco più di 14 gauss. (Il campo terrestre in confronto varia da 0,3 gauss a 0,8 gauss sulla superficie.)

Entro circa tre raggi gioviani non si può più assimilare il campo magnetico di Giove a un dipolo. Le misurazioni effettuate da *Pioneer 11* hanno mostrato che tale campo ha momenti di quadrupolo e ottupolo, cioè che ci sono componenti del campo con quattro e otto poli rispettivamente. Non si sa ancora come sono orientati rispetto al pianeta e al campo dipolare questi campi di ordine superiore. Probabilmente riflettono una qualche configurazione complessa di circolazione entro l'idrogeno metallico liquido dell'interno del pianeta. Tali campi si possono rivelare solo vicino al pianeta perché diminuiscono con la distanza molto più rapidamente del campo dipolare. L'intensità del campo dipolare diminuisce con la terza potenza della distanza, ma il campo di quadrupolo diminuisce con la quarta potenza della distanza e quello di ottupolo con la quinta potenza.

Il campo magnetico unitamente al plasma che porta con sé costituisce la magnetosfera di Giove. All'esterno della ionosfera, le regioni circostanti del pianeta sono quasi completamente caratterizzate dalla magnetosfera e dalle sue interazioni col vento solare interplanetario e coi satelliti più interni. Quando il vento viene in urto con il campo si stabilisce equilibrio tra la pressione del vento e la pressione interna del campo magnetico e del plasma. Il confine tra i due regimi si chiama magnetopausa. Poiché il vento solare è supersonico rispetto a Giove e agli altri pianeti, si forma un'onda d'urto davanti alla magnetopausa (si veda l'articolo *Particelle e campi interplanetari* di James A. van Allen, a pagina 128).

La geometria della magnetosfera terrestre è essenzialmente simile a quella di Giove e la magnetopausa terrestre si forma a una distanza tra 70 000 e 80 000 chilometri dalla Terra. La magnetosfera di Giove è molto più grande: la distanza tra il pianeta e la magnetopausa può essere fino a 100 volte superiore. Contribuisce a questa differenza di scala il fatto che la pressione del vento solare diminuisce con il quadrato della distanza dal Sole; poiché Giove è cinque volte più lontano dal Sole della Terra, il vento solare è 25 volte più debole. Il campo magnetico di Giove è circa un ordine di grandezza più intenso di quello terrestre e le regioni esterne della magnetosfera di Giove sono assai gonfiate di plasma termico. Se si potesse vedere la magnetosfera di Giove a occhio nudo, ci apparirebbe di dimensioni almeno doppie rispetto alle dimensioni apparenti della Luna.

La magnetosfera di Giove è non solo grande, ma anche assai variabile; in particolare è sensibile a variazioni relativamente piccole della pressione del vento solare. *Pioneer 10* e *Pioneer 11*, durante l'avvicinamento al pianeta, hanno registrato attraversamenti della magnetopausa a distanze comprese tra un massimo di 100 e un minimo di 50 raggi gioviani dal pianeta. Per la magnetosfera terrestre un restringimento o un'espansione di un fattore due è estremamente raro ed è probabile solo durante le tempeste magnetiche solari più intense.

L'analisi dell'ambiente elettromagnetico di Giove è ulteriormente complicata dalla presenza e dal moto di satelliti entro la magnetosfera. Dei tredici satelliti noti, cinque influenzano la distribuzione delle particelle cariche: i quattro satelliti galileiani e Amaltea, il satellite più interno.

Le orbite degli altri satelliti sono generalmente oltre la magnetosfera, analogamente a come la Luna ruota al di là della zona della magnetosfera terrestre. Ciascuno dei satelliti interni può intercettare particelle cariche e allontanarle perciò dalla popolazione delle fasce di radiazione. Muovendosi sulla sua orbita un satellite può formare un corridoio libero (mentre acquista egli stesso una intensa radioattività). Perfino Amaltea riesce ad allontanare particelle dalla magnetosfera; il suo diametro è solo di 150 chilometri, ma ruota intorno al pianeta in sole 12 ore e attraversa la parte centrale della fascia di radiazione.

Uno dei satelliti galileiani, Io, ha un effetto ancora più profondo sulla magnetosfera. Non solo intrappola particelle, ma ne produce anche e le accelera. È noto da molto tempo che Io ha una certa influenza sulle emissioni radio decametriche rilevate da Terra. Quando il satellite è in certe posizioni rispetto alla congiungente Terra-Giove, l'entità delle emissioni cresce. Una spiegazione possibile di tale incremento è stata proposta quando *Pioneer 11* dimostrò che Io possiede una ionosfera. Poiché la ionosfera costituisce un fluido conduttore, il moto di Io nel campo magnetico di Giove genera un potenziale attraverso il satellite. Le particelle cariche che incontrano questo potenziale sarebbero accelerate e perciò indotte a emettere onde radio. *Pioneer 11*, attraversando le linee di campo magnetico che passavano attraverso Io, incontrò elettroni in numero sufficiente per spiegare le emissioni radio. Resta però incerto se gli elettroni producono veramente la radiazione osservata.

La ionosfera di Io è rarefatta, ma la sua presenza presuppone che il satellite abbia anche un'atmosfera, se pure a pressione molto bassa. È stata osservata una parte di toro di idrogeno neutro che si estende dalle due parti di Io lungo la sua orbita. Queste scoperte furono sorprendenti, dato che Io ha dimensioni circa pari a quelle della Luna, e questa non è stata in grado di conservare un'atmosfera. La spiegazione si trova probabilmente nella posizione di Io entro le fasce di radiazione di Giove. La fuga di gas da Io potrebbe essere continuamente bilanciata dalla cattura di ioni della magnetosfera.

Entro l'orbita di Amaltea, a 2,5 raggi di Giove, il flusso di elettroni e di protoni energetici diventa più complesso, proprio come lo diventa il campo magnetico. La densità delle particelle non raggiunge un massimo singolo avvicinandosi all'equatore magnetico o alla superficie del pianeta, ma il flusso di particelle varia da luogo a luogo in modo complesso, con concentrazione di particelle in vari punti. In assenza di satelliti entro l'orbita di Amaltea, la distribuzione di particelle che si osserva può essere spiegata solamente con irregolarità del campo magnetico.

Nella magnetosfera esterna, oltre circa 20 raggi di Giove, la distribuzione di particelle cariche si è pure rivelata più complessa di quello che si supponeva inizialmente. *Pioneer 10*, che è passato vicino a Giove su una traiettoria equatoriale, ha indicato che il flusso di elettroni energetici era intenso vicino all'equatore magnetico, ma al di fuori scendeva a valori quasi interplanetari. Questa osservazione suggerì che il campo magnetico di Giove confina le particelle in una stretta lamina vicino all'equatore magnetico. Ci si attendeva che *Pioneer 11*, il quale doveva abbandonare la magnetosfera ad alte latitudini, incontrasse solo basse intensità di elettroni energetici. In realtà il flusso di elettroni rivelato durante il viaggio di *Pioneer 11* fu più alto di quello osservato in precedenza da altri veicoli spaziali.

Elettroni di alta energia furono rivelati dalla sonda spaziale Pioneer anche in un altro luogo inaspettato: di fronte all'onda d'urto «di prua» nello spazio interplanetario. È chiaro che una certa frazione di elettroni può sfuggire dalla magnetosfera esterna. Quando furono scoperti questi elettroni, vennero esaminate di nuovo le registrazioni effettuate dai primi satelliti artificiali in orbita attorno alla Terra e si trovò che contenevano prove che le particelle si dirigono sempre verso la Terra. I dati dei satelliti mostrarono un incremento nel livello di fondo degli elettroni dei raggi cosmici, circa ogni 13 mesi, un'anomalia che non era stata compresa quando furono registrati tali dati. Ora sappiamo che il significato di questo intervallo è legato alle orbite della Terra e di Giove: ogni 13 mesi i due pianeti sono uniti dalle linee a spirale del campo magnetico interplanetario. Gli elettroni sono chiaramente di origine gioviana: persino la Terra non può sfuggire all'influenza del pianeta maggiore.

Molti degli enigmi e dei dubbi che rimangono sull'interpretazione di Giove saranno senza dubbio risolti nei prossimi anni mediante osservazioni sia dalla Terra sia dai veicoli spaziali. Per esempio, una camera televisiva ad alta risoluzione montata su una sonda di cui si prevede il lancio verso Giove alla fine di questo decennio porterà informazioni più particolareggiate sulla struttura delle nubi di Giove e sulle caratteristiche superficiali dei satelliti galileiani. Per una conoscenza più precisa della struttura e della composizione dell'atmosfera di Giove e della natura della magnetosfera si dovrà probabilmente attendere una sonda che penetri nell'atmosfera e una sonda che entri in orbita intorno a Giove, prevista, per ora, per gli anni ottanta.